

# CONFORMADO TERMICO MEDIANTE LINEAS DE CALOR EN ACEROS ESTRUCTURALES: MODELO EXPERIMENTAL Y NUMERICO DEL PROCESO.

Trabajo realizado por:

*Pablo Carral Muñoz*

Dirigido:

*Sergio Cicero Gonzalez*

*Borja Arroyo Martinez*

Titulación:

*Máster Universitario en Integridad  
Durabilidad de Materiales, Componentes  
y Estructuras*

Santander, Octubre de 2020

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## **RESUMEN**

En el presente trabajo recoge los contenidos de la investigación sobre la denominada técnica del curvado mediante líneas de calor (line heating method), la cual se emplea con asiduidad en elementos de construcción naval, aunque se podría utilizar en el ámbito de la construcción.

La técnica de curvado mediante líneas de calor consiste en la realización de líneas, mediante la aplicación de llama a través de un soplete, modificaciones permanentes en la forma de un componente metálico (de acero en la inmensa mayoría de los casos) previamente fabricado con el fin de ajustarse a una geometría dada. El procedimiento normalmente es aplicado para aplicar una curvatura en las placas, para satisfacer exigencias geométricas difíciles o imposibles de alcanzar a través del proceso mecánico (por ejemplo, el conformado mecánico), para el uso naval. La técnica de conformado térmico se puede realizar tanto en fabrica o in situ (es decir en el emplazamiento definitivo de la chapa).

El objetivo de este trabajo es lograr establecer una metodología normalizada de actuación con la que nos permita diseñar el procedimiento de calentamiento adecuado para lograr conseguir la geometría final que deseamos obtener con esta técnica con la información disponible (propiedades de la llama y de los materiales) sin afectar –o haciéndolo de manera controlada– aquellas propiedades del material responsables de su idoneidad para el servicio; idealmente, el proceso debe tener en consideración la viabilidad práctica del mismo minimizando en consecuencia los costes experimentales y económicos asociados.

Con el trabajo experimental y analítico recogidos a lo largo de este trabajo van en esa dirección. Además, con ayuda de la técnica de simulación numérica por Elementos Finitos (ANSYS), nos permitirá visualizar el comportamiento del material con diferentes calores.

## **ABSTRACT**

The research developed during the TFM analyses the technique of heat line bending, which is widely used in shipbuilding elements, although it could be used in the construction field.

The technique of bending by means of heat lines consists of making lines by applying the flame through a torch, permanent modifications in the form of a metallic component (steel in most cases) previously made to adapt to a certain geometry. The method is usually applied to obtain a curvature in the plates, to satisfy geometrical requirements difficult or impossible to achieve by the mechanical process (for example, mechanical shaping), for naval use. The thermal bending technique can be carried out in the factory or on site (i.e. at the final location of the plate).

The objective of this work is to achieve the application of a standardised action methodology with which we can design the appropriate heating procedure to achieve the final geometry we wish to obtain with this technique and with the information available (properties of the flame and the materials) without affecting - or doing so in a controlled way - the properties of the material responsible for it is suitability for the service; ideally, the process should take into account its practical viability, minimising the associated experimental and economic costs.

With the experimental and analytical work collected throughout this work, progress is being made in this direction. Furthermore, with the help of the numerical simulation technique by finite elements (ANSYS), it will allow us to visualise the behaviour of the material with different heating.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores del proyecto Sergio Cicero y Borja Arroyo por el apoyo y las enseñanzas recibidas a lo largo del trabajo y del curso, apoyarme en la resolución de dudas.

Por último, a mi familia, amigos, compañeros, personal docente y administrativo de la Universidad de Caminos.

# ***INDICE***

# **INDICE**

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
INDICE.....	5
ILUSTRACIONES .....	8
TABLAS.....	11
ECUACIONES .....	13
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	15
1.1.    INTRODUCCIÓN.....	15
1.2.    OBJETIVOS .....	17
1.3.    METODOLOGIA .....	18
CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1.    INTRODUCCIÓN.....	20
2.2.    ORIGEN .....	22
2.3.    PATRONES MÁS COMUNES DE CALENTAMIENTO .....	23
2.3.1.  Calentamiento en forma de V o de Triangulo.....	23
2.3.2.  Calentamiento en líneas.....	24
2.3.3.  Calentamiento de puntos aislados.....	26
2.4.    CONCEPTOS DE DEFORMACIÓN DE METALES .....	27
2.4.1.  Deformación plástica.....	28
2.4.2.  Conformado en frío .....	30
2.4.3.  Conformado en Caliente .....	32
2.5.    CONFORMADO MECANICO .....	33
2.5.1.  Prensado por aplicación repetitiva .....	33
2.5.2.  Single Point Forming – Robot Forming.....	34
2.5.3.  Multipoint Forming .....	36
2.5.4.  Hot Multipoint Forming .....	37
2.5.5.  Hydroforming .....	38
2.5.6.  Multi-post Hydroforming .....	38

2.5.7.	Explosive Forming .....	40
2.5.8.	Multipoint Stretch Forming.....	40
2.5.9.	Flexibly Reconfigurable Roll Forming .....	41
2.5.10.	Curvado con sistema de rodillos LARS .....	42
2.6.	CONFORMADO TERMICO .....	44
2.6.1.	Curvado por llama-manual.....	44
2.6.2.	Enderezado por llama .....	48
2.6.3.	Sistema gobernado.....	50
2.6.4.	Curvado por llama – automático.....	51
2.6.5.	Curvado por laser .....	52
2.7.	ACERO.....	54
2.7.1.	Temperaturas de cambio de fase eutéctico.....	54
CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOLOGIA.....		70
3.1.	INTRODUCCIÓN. ....	70
3.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS ACEROS.....	70
3.2.1.	Designación de los aceros. ....	71
3.2.2.	Aceros estructurales.....	74
3.2.2.1.	Aceros estructurales no aleados. ....	75
3.2.2.2.	Aceros soldables y de grano fino con laminación termomecánica.....	77
3.3.	METODOLOGIA DE TRABAJO.....	81
3.3.1.	Introducción. ....	81
3.3.2.	Explicación de los ensayos. ....	81
3.3.3.	Ejecución de los ensayos.....	87
3.4.	EXPLICACIÓN DE LAS FASES DE MODELADO EN ANSYS. ....	98
3.4.1.	Propiedades del Material. ....	99
3.4.1.1.	Propiedades S275.....	99
3.4.1.2.	Propiedades AH32.....	105
3.4.2.	Geometría y Mallado.....	112
3.4.3.	Análisis Térmico.....	113
3.4.3.1.	Análisis del coeficiente de expansión térmica.....	114
3.4.4.	Análisis Estructural. ....	115
CAPITULO 4. RESULTADOS.....		118
4.1.	INTRODUCCIÓN. ....	118
4.1.1.	Resultados tras el Modelado. ....	118

4.1.2. Resultados del AH32 .....	120
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	124
5.1. INTRODUCCIÓN. ....	124
5.2. RESUMEN DE LOS TRABAJOS DESARROLLADOS.....	124
BIBLIOGRAFIA .....	128



## **ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Funcionamiento del patrón de calentamiento en V. ....	24
Ilustración 2. a) Esquema de un patrón de calentamiento línea, b) Patrón lineal de calentamiento manual sobre una chapa de acero.....	25
Ilustración 3. Proceso de calentamiento en líneas. ....	26
Ilustración 4. Aplicación del calor en un punto. La llama se va moviendo en círculos encima. .	27
Ilustración 5. Esquema de relaciones entre campos térmicos, tensionales y microestructurales en metales[2].....	28
Ilustración 6. Curvas tensión-deformación real e ingenieril típicas del acero [4]. ....	29
Ilustración 7. Curvas ideales de tensión deformación: (a) perfectamente elástico, (b) rígido perfectamente plástico (c) elástico perfectamente plástico (d) rígido con endurecimiento por deformación, (e) elástico con endurecimiento por deformación [5]. ....	29
Ilustración 8. Movimiento de una dislocación en la red cristalina [6]. ....	30
Ilustración 9. Influencia de la velocidad de deformación a) y de la temperatura b) sobre la curva tensión deformación [3]. ....	30
Ilustración 10. Efectos de las etapas de restauración, recristalización y crecimiento de grano en las propiedades mecánicas y microestructura del metal [3]. ....	32
Ilustración 11. Verificación dimensional con plantillas (izqda.) y aplicación de la carga durante el proceso .....	34
Ilustración 12. Esquemas de Single Point Forming [11]. ....	35
Ilustración 13. Esquema de Single Point Incremental Forming[11]. ....	35
Ilustración 14. Modelo 3D del proceso de conformado en programa de diseño (izqda.) y pieza acabada (dcha.)[13]. ....	36
Ilustración 15. Matrices de herramientas convertibles de Hot Multipoint Forming. ....	37
Ilustración 16. Esquema del experimento de Multiple-post Hydroforming. ....	38
Ilustración 17. Esquema de la máquina de hydroforming y multipoint forming combinados. ...	39
Ilustración 18. Sección de teselas y actuadores.....	39
Ilustración 19. Máquinas de Multipoint Stretch Forming. ....	41
Ilustración 20. Modelo de conformado mediante rodillos de flexibilidad reconfigurable. ....	42
Ilustración 21. Esquema del principio de deformación por doble flexión del sistema LARS [24]. ....	42
Ilustración 22. Prototipo del sistema LARS[24]. ....	43
Ilustración 23. Líneas de calor y triángulos de calor.....	44
Ilustración 24. Etapas del proceso de curvado mediante líneas de calor (manual). ....	45
Ilustración 25. Contracción en cada superficie en función de la velocidad de la antorcha. ....	46
Ilustración 26. Deformación angular en función de la velocidad de antorcha y del espesor de las placas sin pretensado.....	46
Ilustración 27. Efectos de pretensado sobre la deformación angular. ....	47
Ilustración 28. Cupón de experimento de superposición de líneas de calor.....	47
Ilustración 29. Reducción de deformación angular en función de distancia entre líneas de calor. ....	48
Ilustración 30. Mezclas de llamas y flujo térmico.....	49
Ilustración 31. Mezcla y posición del cono recomendados.....	50
Ilustración 32. Sistema gobernado de líneas de calor. ....	51

Ilustración 33. IHI- $\alpha$ sistema de líneas de calor automático. ....	52
Ilustración 34. IHI- $\alpha$ patrón de líneas de calor en la cara superior.....	52
Ilustración 35. Opciones de conformado asistido por láser.....	53
Ilustración 36 . Situación de $A_{e3}$ y $A_{e1}$ en el diagrama de hierro-carbono. ....	55
Ilustración 37. Temperaturas de equilibrio para aceros especificados en normas según Andrews. ....	58
Ilustración 38. Temperaturas de equilibrio para aceros especificados en normas según Eldis. ..	59
Ilustración 39. Temperaturas de equilibrio para aceros especificados en normas según Grange. .....	59
Ilustración 40. Transformación de fase del AISI 5120 durante calentamiento continuo[35].....	63
Ilustración 41. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Hougardy.....	67
Ilustración 42. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Kasatkin.....	67
Ilustración 43. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Trzaska (I)[35] .....	68
Ilustración 44. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Trzaska (II)[36]. ....	68
Ilustración 45. Nomenclatura según [43] para aceros. ....	73
Ilustración 46. Esquema del proceso de laminado convencional [52].....	79
Ilustración 47. Esquema del proceso de laminación termomecánica [52] .....	79
Ilustración 48. Antorcha.....	82
Ilustración 49.1º Ensayo. Dirección y orden de líneas de calor. Numeración de cantos.....	82
Ilustración 50. 2º Ensayo. Dirección y orden de líneas de calor. Numeración de cantos.....	83
Ilustración 51. Grafica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 1).....	88
Ilustración 52. Gráfica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 2).....	88
Ilustración 53. Gráfica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 3).....	89
Ilustración 54. Gráfica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 4).....	90
Ilustración 55. Imagen de la placa después de haber trazo 1 línea de calor .....	90
Ilustración 56. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 6).....	91
Ilustración 57. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 5).....	92
Ilustración 58. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 7).....	92
Ilustración 59. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 8).....	93
Ilustración 60.. Imagen de la placa después de haber trazo 3 línea de calor .....	94
Ilustración 61. Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 1). ....	95
Ilustración 62. Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 2). ....	95
Ilustración 63. Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 3). ....	96
Ilustración 64. Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 4). ....	97
Ilustración 65. Imagen de la placa después de haber trazo 3 línea de calor (2 ultimas después de un tiempo).....	97
Ilustración 66. Conductividad térmica del S275 .....	100
Ilustración 67, Calor específico del S275.....	100

Ilustración 68. Propiedades estructurales del S275 .....	101
Ilustración 69. Tensión/Deformación a diferentes temperaturas S275 .....	102
Ilustración 70. Coeficiente de expansión térmica S275.....	104
Ilustración 71. Conductividad térmica del AH32 .....	106
Ilustración 72. Calor específico del AH32 .....	107
Ilustración 73. Propiedades estructurales del AH32 .....	108
Ilustración 74. tensión/Deformación a diferentes temperaturas del AH32.....	109
Ilustración 75. Coeficiente de expansión térmica AH32.....	111
Ilustración 76. Mallado de una línea de calor .....	112
Ilustración 77. Modelado 3D del aporte de calor.....	113
Ilustración 78. Aplicación de 1 Línea de Calor .....	114
Ilustración 79. Coeficientes de expansión térmica.....	115
Ilustración 80. Deformación de 1 Línea de Calor.....	116
Ilustración 81. REF 1 1 línea de Calor ANSYS (S275) .....	118
Ilustración 82. REF 2 1 línea de Calor ANSYS (S275) .....	119
Ilustración 83. REF 3 1 línea de Calor ANSYS (S275) .....	119
Ilustración 84. REF 4 1 línea de Calor ANSYS (S275) .....	120
Ilustración 85. REF 1 1 línea de Calor ANSYS (AH32) .....	120
Ilustración 86. REF 2 1 línea de Calor ANSYS (AH32) .....	121
Ilustración 87. REF 3 1 línea de Calor ANSYS (AH32) .....	121
Ilustración 88. REF 4 1 línea de Calor ANSYS (AH32) .....	122

## **TABLAS**

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes del conformado en frío frente a caliente [3].	31
Tabla 2. Ventajas e inconvenientes del conformado en caliente respecto al frío [3].	32
Tabla 3. Ventajas e inconvenientes del prensado por aplicación repetitiva [3].	34
Tabla 4. Ventajas e inconvenientes del Single Point Incremental Forming[11].	36
Tabla 5. Relación entre temperaturas y clases de acero estructural según BOC.	48
Tabla 6. Composición química según normas	56
Tabla 7. Temperaturas de transformación para aceros de normas según Andrews.	57
Tabla 8. Temperaturas de transformación para aceros de normas según Eldis y Grange.	58
Tabla 9. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros de normas según Hougardy, Kasatkin, Trzaska [35] y Trazska [36].	62
Tabla 10. Composición química según artículos.	64
Tabla 11. Temperaturas de transformación para aceros analizados en artículos según Andrews, Eldis y Grange.	65
Tabla 12. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Hougardy, Kasatkin, Trzaska [35] y Trazska [36].	66
Tabla 13. Tipos de aceros recogidos por las normas [42] y [43]	72
Tabla 14. Símbolos adicionales utilizados en los aceros estructurales.	74
Tabla 15. Clases de aceros laminados en caliente no aleados [42].	76
Tabla 16. Características mecánicas de los aceros no aleados laminados en caliente a temperatura ambiente según [42]	76
Tabla 17. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente según [42]	77
Tabla 18. Composición química de los distintos aceros laminados termomecánicamente [42].	80
Tabla 19. Propiedades mecánicas de los aceros laminados termomecánicamente [42].	80
Tabla 20. Plantilla de medición.	83
Tabla 21. Tiempos de 1 Línea de Calor	84
Tabla 22. Tiempos de 3 Línea de Calor.	85
Tabla 23. Tiempos de 3 Línea de Calor y con descanso tras la realización de 1 Línea de Calor	86
Tabla 24. Medidas de 1 Línea de Calor (REF 1).	87
Tabla 25 Medidas de 1 Línea de Calor (REF 2).	88
Tabla 26. Medidas de 1 Línea de Calor (REF 3).	89
Tabla 27. Medidas de 1 Línea de Calor (REF 4).	89
Tabla 28. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 6).	91
Tabla 29. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 5).	91
Tabla 30. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 7).	92
Tabla 31. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 8).	93
Tabla 32. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 1).	94
Tabla 33. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 2).	95
Tabla 34. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 3).	96
Tabla 35. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 4).	96
Tabla 36. Densidad del S275	99
Tabla 37. Temperatura de fusión S275	99
Tabla 38. Propiedades térmicas del S275.	99
Tabla 39. Propiedades estructurales del S275.	101

Tabla 40. tensión/Deformación a diferentes temperaturas del S275. -----	102
Tabla 41. Coeficiente de expansión térmica S275.-----	103
Tabla 42.Densidad AH32 -----	105
Tabla 43. Temperatura de fusión AH32-----	105
Tabla 44.Propiedades térmicas del AH32 -----	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 45. Propiedades estructurales del AH32 -----	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 46. tensión/Deformación a diferentes temperaturas del AH32 -----	108
Tabla 47. Coeficiente de expansión térmica AH32-----	110

## **ECUACIONES**

- (1) FORMULA DE ANDREWS. Ae3 (°C). TEMPERATURA DE EQUILIBRIO SUPERIOR ENTRE FERRITA Y AUSTENITA
- (2) FORMULA DE ANDREWS. Ae1 (°C). TEMPERATURA DE EQUILIBRIO INFERIOR ENTRE FERRITA Y AUSTENITA
- (3) FORMULA DE ELDIS. Ae3 (°C). TEMPERATURA DE EQUILIBRIO SUPERIOR ENTRE FERRITA Y AUSTENITA
- (4) FORMULA DE ELDIS. Ae1 (°C). TEMPERATURA DE EQUILIBRIO INFERIOR ENTRE FERRITA Y AUSTENITA
- (5) FORMULA DE GRANGE. Ae3 (°F). TEMPERATURA DE EQUILIBRIO SUPERIOR ENTRE FERRITA Y AUSTENITA
- (6) FORMULA DE GRANGE. Ae1 (°F). TEMPERATURA DE EQUILIBRIO INFERIOR ENTRE FERRITA Y AUSTENITA
- (7) FORMULA DE HOUARDY .Ac3 (°C). TEMPERATURA SUPERIOR DEL CAMPO DE FERRITA-AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.
- (8) FORMULA DE HOUARDY .Ac1(°C). TEMPERATURA MÁS BAJA DEL CAMPO DE FERRITA AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.
- (9) FORMULA DE KASATKIN.Ac3 (°C). TEMPERATURA SUPERIOR DEL CAMPO DE FERRITA-AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.
- (10) FORMULA DE KASATKIN.Ac1(°C). TEMPERATURA MÁS BAJA DEL CAMPO DE FERRITA-AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.
- (11) FORMULA DE TRZASKA (I).Ac3 (°C). TEMPERATURA SUPERIOR DEL CAMPO DE FERRITA-AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.
- (12) FORMULA DE TRZASKA (I).Ac1(°C). TEMPERATURA MÁS BAJA DEL CAMPO DE FERRITA-AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.
- (13) FORMULA DE TRZASKA (II).Ac3 (°C). TEMPERATURA SUPERIOR DEL CAMPO DE FERRITA-AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.
- (14) FORMULA DE TRZASKA (II).Ac1(°C). TEMPERATURA MÁS BAJA DEL CAMPO DE FERRITA-AUSTENITA DURANTE EL CALENTAMIENTO.

# ***CAPITULO 1.***

# ***INTRODUCCIÓN***

## ***CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN***

### ***1.1. INTRODUCCIÓN.***

El trabajo que se presenta a continuación recoge los contenidos de la investigación llevada a cabo por su autor en colaboración con el Centro Tecnológico CTC, en relación con la denominada técnica del curvado mediante líneas de calor (line heating method), la cual se emplea con asiduidad en elementos de construcción naval, aunque se podría utilizar en el ámbito de la construcción.

La técnica de curvado mediante líneas de calor consiste en la realización de líneas, mediante la aplicación de llama a través de un soplete, modificaciones permanentes en la forma de un componente metálico (de acero en la inmensa mayoría de los casos) previamente fabricado con el fin de ajustarse a una geometría dada. El procedimiento normalmente es aplicado para aplicar una curvatura en las placas, para satisfacer exigencias geométricas difíciles o imposibles de alcanzar a través del proceso mecánico (por ejemplo, el conformado mecánico), para el uso naval. La técnica de conformado térmico se puede realizar tanto en fabrica o in situ (es decir en el emplazamiento definitivo de la chapa).

En la actualidad, la correcta aplicación del curvado térmico se basa en un proceso de prueba y error en la cual la destreza y experiencia del operario juegan un papel importante (en ocasiones, determinante). Hay diferentes estudios en los que nos ofrecen recomendaciones de buena práctica sobre los patrones de calentamiento que deben ser aplicados de cara a obtener según qué resultados. El curvado por llama es un fenómeno complejo, practicado en numerosos fenómenos, habitualmente poco o mal conocido. Estas dificultades a favorecido al desarrollo y establecimiento de una metodología normalizada de actuación la cual debería permitir el diseño del procedimiento de calentamiento adecuado para alcanzar la geometría final deseada en el componente partiendo de la información disponible (propiedades de la llama y de los materiales) sin afectar –o haciéndolo de manera controlada– aquellas propiedades del material responsables de su idoneidad para el servicio; idealmente, el proceso debe tener en consideración la viabilidad práctica del mismo minimizando en consecuencia los costes experimentales y económicos asociados.

Los trabajos experimentales y analíticos recogidos a lo largo de este trabajo van en esa dirección. Se presentan las fases llevadas a cabo en relación con las consecuencias de proceso de curvado por llama sobre las propiedades mecánicas de aceros estructurales utilizados en la



industria y en la construcción naval; se trata de los aceros S275 y AH32. Se proponen dos métodos predictivos sobre las consecuencias del conformado térmico en la deformación final del componente: el primero de ellos es de naturaleza analítica mientras que el segundo se basa en la técnica de simulación numérica de los Elementos Finitos.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo que se persigue con este Trabajo de Final de Máster (TFM) es desarrollar y validar una metodología de modelado numérico mediante elementos finitos de conformado de chapas mediante líneas de calor. Para ello, se establecerán una serie de objetivos a desarrollar a lo largo del trabajo:

- DESARROLLO TEORICO:

- **OT.1:** Analizar en profundidad la metodología utilizada en el conformado de chapas a nivel teórico: su origen, sus características, sus ventajas y sus ideas de futuro.
- **OT.2:** Analizar la evolución de las diferentes técnicas de calentamiento utilizadas para este tipo de método.
- **OT.3:** Analizar las diferentes temperaturas de conformado para diferentes aceros.

- DESARROLLO PRACTICO:

- **OP.1:** Estudio de los materiales y sus propiedades térmicas y estructurales.
- **OP.2:** Estudio de parámetros térmicos aplicados a los modelos (potencia térmica, convección, radiación, etc.).
- **OP.3:** Desarrollar modelo de elementos finitos.
- **OP.4:** Realizar una comparación del modelo real y el modelo mediante elementos finitos.
- **OP.5:** Comparación del comportamiento de diferentes aceros estructurales.

Validar la metodología de simulación mediante elementos finitos de conformado de placas mediante líneas de calor.

### ***1.3. METODOLOGIA***

Primero se realizará un estudio del estado del arte que permita conocer el proceso de conformado de chapas de acero, centrados en las líneas de calor, su finalidad en la industria, su origen, sus características, sus ventajas y limitaciones frente a otras formas de conformado.

Además, se determinará cuál de las diferentes técnicas de calentamiento es la más adecuada, desde un punto de vista teórico. Posteriormente se pretende conocer la temperatura adecuada que permita mantener las propiedades mecánicas del acero, para que no se produzcan cambios metalográficos. Para ello mediante unos estudios se verá cuál es el acero más adecuado para esta metodología.

Por otro lado, se desarrollará un modelo numérico de análisis termo-estructural, cuyos resultados serán comparados con los obtenidos de un caso real ejecutado en laboratorio. De esta forma, se pretende comprobar la exactitud del modelo numérico desarrollado. Para ello es necesario obtener propiedades térmicas y estructurales del acero utilizado y, determinar los parámetros térmicos y estructurales a introducir en el modelo de análisis.

Una vez completados todos los objetivos, se extraerán unas conclusiones que permitirán, poder validar la metodología de simulación mediante elementos finitos de conformado de placas mediante líneas de calor.

# ***CAPITULO 2.***

# ***ESTADO DEL***

# ***ARTE***

## ***CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE***

### ***2.1. INTRODUCCIÓN***

El conformado de metales es un proceso que se realiza habitualmente en ingeniería mecánica, arquitectura naval, ingeniería aeronáutica y aeroespacial. La formación tiene lugar en un metal cuando este se encuentra sometido a tensiones superiores que, a la tensión de rendimiento, de modo que la deformación se desplaza desde el rango elástico al plástico. Todos los métodos de conformado de metales se basan en una combinación de plástico y deformación elástica.

De acuerdo con las condiciones de baja temperatura, las cuales se llevan a cabo, los procesos de conformado en frío o en caliente. El conformado en frío se realiza generalmente a temperatura ambiente, mientras que el conformado en caliente se realiza a temperaturas superiores a la ambiente. Dado que a medida que aumenta la temperatura, el rendimiento y la velocidad de endurecimiento por deformación generalmente disminuirá progresivamente y la ductilidad del material se verá aumentada, se requerirá menos energía para conformar en caliente la placa. Por el contrario, un material formado en frío exhibirá una alta resistencia y requerirá más energía. Cualquiera que sea el método utilizado, cualquier proceso de conformado del metal impondrá tensiones residuales en el metal debido a la deformación plástica no uniforme inducida durante el proceso de formación.

De acuerdo con los mecanismos utilizados para el conformado de placas, los métodos para formar placas de acero en capas curvas se clasifican en conformado mecánico y conformado térmico. En cualquiera de estos dos tipos de conformado, las placas se conforman en la forma deseada generando unas deformaciones plásticas en cantidades y distribuciones apropiadas. En el conformado mecánico de una placa de acero, estas deformaciones plásticas se producen presionando mecánicamente la placa hasta obtener una matriz con la forma deseada, o alimentando la placa a través de un conjunto de rodillos (laminado en frío), para producir la forma buscada. Este tipo de conformado mediante el uso de un troquel es más adecuado para grandes cantidades de producción, lo que permite que los costes de desarrollo y herramienta se amorticen a lo largo de cientos o miles de piezas. Un ejemplo de esta aplicación es la formación de carrocerías de automóviles a partir de láminas delgadas. La formación mecánica mediante el uso del troquel no es adecuada para el conformado de placas del casco de un barco. En su lugar, se utiliza un conjunto de rodillos anchos para obtener placas curvadas de forma individual, y rodillos estrechos para obtener placas doblemente curvadas.

Cuando una palca se conforma térmicamente, la deformación plástica se genera por los esfuerzos térmicos generados durante los procesos de calentamiento y enfriamiento de la placa. A lo largo de este proceso, un lado de la placa se calienta mientras que el otro lado se mantiene frío. El gradiente de temperatura generado en el material a través del espesor hace que el metal se doble en una dirección. Mientras, el metal se encuentra expandido está limitado por el metal más frío que lo rodea, y se generan esfuerzos de compresión. Cuando se retira el calor, la placa se enfría y el metal se contrae. La placa se deformará y asumirá un estado de equilibrio en la dirección inversa a la que se calentó. La curvatura generada es una función del gradiente de temperatura entre la superficie superior e inferior de la placa. Un sistema de conformado térmico idóneo sería el capaz de calentar una placa de acero con el gradiente de temperatura deseado en cualquier punto. En primer lugar, este sistema implica una almohadilla térmica muy grande y debe poder calentar toda la placa al mismo tiempo. En segundo lugar, la distribución del flujo de calor debe ser ajustable de acuerdo con los gradientes de temperatura deseados.

Para la técnica de conformado térmico mediante líneas de calor, se pueden utilizar tres tipos de fuentes de calor en proceso de calentamiento: un soplete de oxiacetileno o un juego de sopletes, calentamiento por inducción y laser. Comparado con el prensado mecánico, el conformado térmico mediante el uso de soplete de oxiacetileno es más versátil y menos costoso. Las placas de acero también pueden conformarse con curvatura doble compleja, y las tensiones residuales resultantes son mínimas. Sin embargo, el calentamiento de línea con un soplete de oxiacetileno tiene algunos inconvenientes. El conformado de líneas de calor es un arte, debido a que requiere muchos años de práctica, ya que están involucrados mecanismos complejos. Para conformar una placa con la forma deseada, uno debe saber cómo calentar la placa. También se debe tener un medio para controlar los procesos de calentamiento y enfriamiento. En comparación con el calentamiento por antorcha, el calentamiento por inducción es más fácil de controlar y se usa en algunos astilleros japoneses, este tipo de conformado térmico está más destinado para grandes placas. La formación por láser utiliza un láser como fuente de calor en lugar de un soplete de oxiacetilénico. Los mecanismos básicos son muy similares al conformado por llama, aunque el de laser tiene algunas ventajas respecto al de llama: La potencia y su distribución son más fáciles de controlar y la región calentada es más pequeña, de modo que se degrada menos el material.

Además, existen técnicas similares que pueden ser de aplicación para parte del método, que pueden darnos información complementaria o servir como técnica auxiliar. En cuanto a técnicas que son similares, nos referimos, por ejemplo, a la técnica de enderezado por llama empleada para realizar correcciones en estructura metálica (p. e. el proyecto europeo OPTISTRAIGHT

[1]), o a la soldadura triple T que consiste en calentar zonas de la chapa mientras se suelda para reducir distorsiones. En lo relativo a técnicas auxiliares se puede considerar la impresión 3D aplicable a la fabricación de troqueles, como también la toma de datos o medida de coordenadas geométricas mediante escaneado 3D y termografía.

Merecen una mención particular, como métodos auxiliares de análisis numérico tanto la metodología de elementos finitos como las de inteligencia artificial y aprendizaje de máquinas, que han conseguido unas mejoras apreciables en la precisión y calidad de estos procesos de cara a su automatización.

## **2.2. ORIGEN**

A fin de obtener una perspectiva general, a lo largo del presente apartado se recoge una visión bibliográfica historia sobre la evolución del conformado por llama, a lo largo de los años, así como del estado actual de la técnica.

Los orígenes del conformado por llama se remontan a los inicios de la técnica de soldadura en los Estados Unidos. Los fabricantes de componentes de acero observaron como el calor de la soldadura causaba frecuentemente deformaciones indeseadas en la región afectada térmicamente. Muchas de las veces la pieza tratada debía ser retirada de modo que, a fin de solventar esta inconveniencia, los soldadores comenzaron a experimentar con distintas técnicas tratando de revertir este tipo de distorsiones; intuitivamente, probaron con diversos patrones de calentamiento para lograr contrarrestar la distorsión inicial. De esta manera, con el paso del tiempo acabaron desarrollando habilidades y destrezas que, a la postre, permitieron enfrentar, no solo el problema de las distorsiones de soldadura sino también la reparación de cualquier otro tipo de deformaciones asociadas al proceso de manufactura. Estos procedimientos térmicos se fueron perpetuando como un arte, pasando de técnico a técnico. Durante este periodo, el uso de elementos de acero dotados de curvatura ganó popularidad tanto por razones prácticas como por consideraciones de índole estética.

El conformado por llama o el calentamiento de una línea con láser ha sido un tema de investigación activo en la fabricación, especialmente en la construcción naval. El profesor Masubuchi fue el principal investigador del primer esfuerzo serio en la formación mediante el uso del láser a partir de la década de 1980 durante los programas de investigación en el MIT<sup>1</sup> patrocinado por la Sociedad de Ingeniería de Soldadura de Japón y la Marina de los Estados Unidos. En estos programas, se llevó a cabo una investigación experimental sistemática para

---

1. MIT: Instituto Tecnológico de Massachusetts

estudiar las relaciones entre los ángulos de flexión y la potencia térmica, la velocidad de la fuente de calor, el tamaño de la placa y el número de pasadas. Se usaron tanto placas de acero dulce como acero de alta resistencia. Se descubrió el efecto borde y se identificó un parámetro de gran importancia que controla principalmente la distorsión angular. La investigación teórica sobre el mecanismo del proceso de calentamiento de línea tuvo como objetivo predecir la forma final de la placa cuando se dan las condiciones de calentamiento y las propiedades mecánicas.

El problema de la formación de llama de las placas metálicas se puede decir en dos subproblemas: el problema de la transferencia de calor y el problema de la deformación elastoplástica, donde la solución del primer problema es un requisito previo del segundo problema. El problema de la transferencia de calor de una fuente de calor en movimiento ha sido ampliamente estudiado en soldadura. Rosenthal derivó la solución analítica del campo de temperaturas para fuentes de calor puntuales y lineales utilizando la ecuación de transferencia de calor para un estado cuasi estacionario.

## ***2.3. PATRONES MÁS COMUNES DE CALENTAMIENTO***

A lo largo del presente apartado se va a comentar de uno de los puntos clave en el conformado por llama es el de la definición de los patrones de calentamiento a aplicar sobre los elementos para conseguir el conformado o curvatura deseada. Estos patrones, son comúnmente utilizados tanto en ingeniería mecánica, arquitectura naval, ingeniería aeronáutica y aeroespacial. A continuación, se explican los principales patrones de conformado térmico.

### ***2.3.1. Calentamiento en forma de V o de Triangulo.***

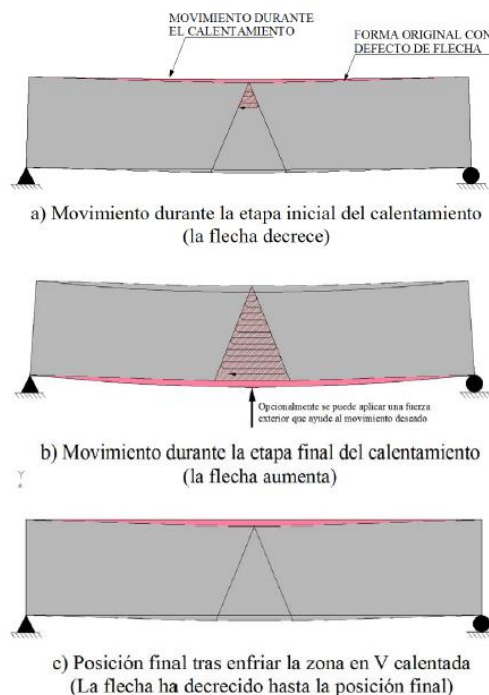
Un calentamiento en V típico comienza en el vértice del área en forma de V mediante el uso de un soplete (de oxiacetilénica, de propano o de propano). Cuando se logra la temperatura deseada en el vértice, la antorcha se hace avanzar progresivamente en un movimiento serpenteante hacia la base de la V. Este movimiento es eficiente para calentar progresivamente la V de arriba hacia abajo. La chapa inicialmente se moverá hacia arriba como resultado de la expansión longitudinal del material por encima del eje neutro generando una flexión negativa, como se ve en la Ilustración 1(A). El material no calentado adyacente a la zona caliente impide la expansión térmica del acero calentado en la dirección longitudinal. Como resultado, el material que se calienta tiende a expandirse, pero, al estar en contacto con el material frío, este se lo impide teniendo al levantarse y resultado en un flujo plástico. Al finalizar el calentamiento, la zona calentada se encuentra a una temperatura alta y relativamente uniforme. En este punto, la



chapa se ha movido hacia abajo, Ilustración 1 (B), debido a la expansión longitudinal del material por debajo del eje neutro generando una flexión positiva. Cuando el acero se enfría, se contrae de forma longitudinal en un grado mayor que lo que se había expandido durante el calentamiento. Consecuentemente, se genera una contracción. La contracción es proporcional a la anchura de la zona calentada a través de la V, por lo que su tamaño aumenta de arriba hacia abajo del perfil.

Esta variación origina un cierre de la V dando lugar a una flexión en un miembro inicialmente recto (si la placa se dobla en la dirección opuesta a la del movimiento de enderezado, como se observa en la Ilustración 1 (C)). Para muchas aplicaciones, es más eficiente utilizar una V que se extienda sobre toda la profundidad de la placa.

Cuando se utiliza uves parciales, el extremo abierto se debe extender hasta el borde del elemento a conformar. La profundidad de la V varía mediante la colocación del vértice de esta en un lugar medio del espesor. Los lugares más comunes para situar el vértice de la V son a  $\frac{3}{4}$  y a  $\frac{1}{2}$  del espesor.

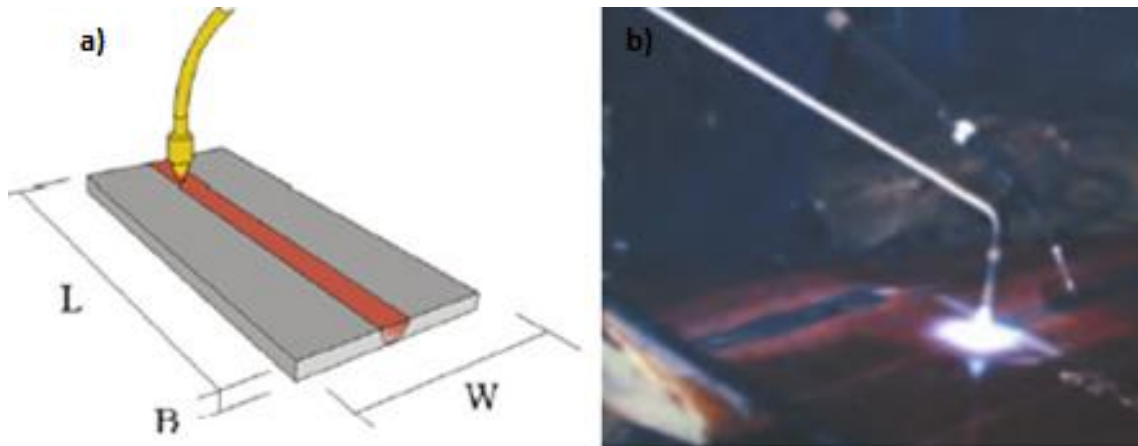


**Ilustración 1. Funcionamiento del patrón de calentamiento en V.**

### **2.3.2. Calentamiento en líneas**

Este tipo de patrón de calentamiento es el que se emplea de forma manual y en algunos casos de forma automática, se utiliza tanto para el conformado de chapas y también para la reparación de

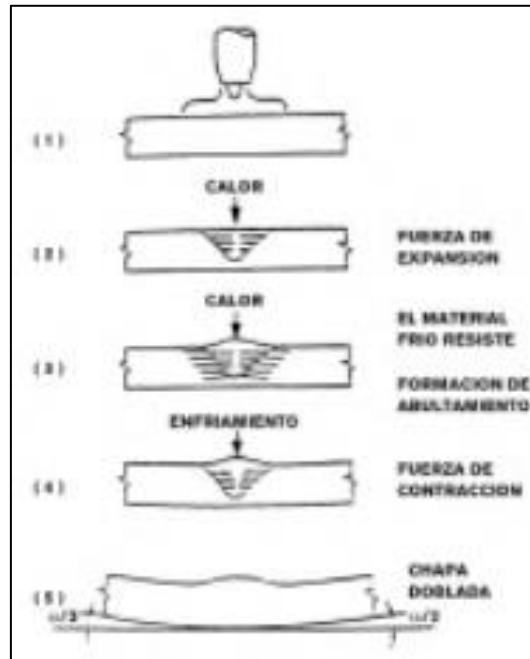
las mismas que se han observado alguna deformación. Tales flexiones, lo suficiente graves como para generar la plastificación del material, suelen dar lugar a bandas largas y estrechas de plastificación. Este patrón de calentamiento se compone de una sola pasada recta de la antorcha, se muestra en la Ilustración 2. Se suelen aplicar fuerzas exteriores que impidan ciertos movimientos o que ayuden a conseguir la deformada que se desea, aunque en algunos casos se trabaja sin restricciones externas.



**Ilustración 2. a) Esquema de un patrón de calentamiento línea, b) Patrón lineal de calentamiento manual sobre una chapa de acero.**

El material dilatado por el calor encuentra una oposición a desarrollarse en el sentido transversal a la línea de aplicación del calor, al ser obstaculizado por las zonas frías de la chapa. Por el contrario, el calor puede deslizarse fácilmente hacia la superficie superior de la chapa, creando una ligera convexidad que aumenta el espesor de la chapa en ese punto.

El enfriamiento rápido hace solidificar la convexidad de la zona calentada, mientras que el espesor en exceso permanece, lo que ocasiona una contracción en sentido transversal que provoca tensiones internas, que van a ocasionar una distorsión angular, el proceso se puede observar en la Ilustración 3 .

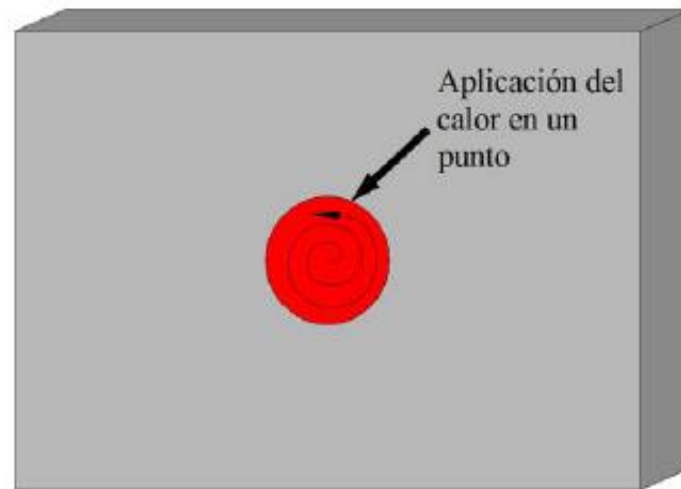


**Ilustración 3. Proceso de calentamiento en líneas.**

### ***2.3.3. Calentamiento de puntos aislados***

Este tipo de patrón consiste en calentar una pequeña zona del acero afectado moviendo la antorcha en un recorrido circular, aumentando el diámetro hasta que toda el área del acero se calentada. La aplicación de un punto de calor provoca el levantamiento a través del espesor debido a la restricción que ejerce el acero frío circundante y que no le permite dilatarse libremente. Durante el enfriamiento, se producen tensiones de tracción en todas las direcciones radiales a la zona calentada debido a la contracción de esta.

Durante la aplicación de este patrón es importante que la llama no se quede estática en ningún punto durante mucho tiempo puesto que provocaría temperaturas demasiado elevadas y producirá deformaciones demasiado grandes. Este tipo de calentamiento se observa en la Ilustración 4.



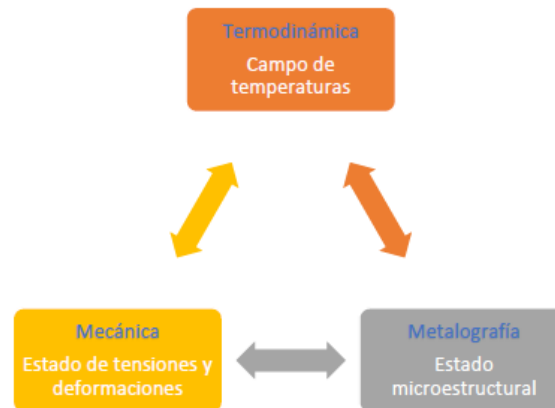
**Ilustración 4. Aplicación del calor en un punto. La llama se va moviendo en círculos encima.**

## ***2.4. CONCEPTOS DE DEFORMACIÓN DE METALES***

A lo largo de este punto se van a describir los conceptos fundamentales más significativos del conformado de metales. Además, se va a introducir lo más reseñable en cuanto a las metodologías de simulación y análisis numérico de estos procesos, debido a la influencia que tienen a la hora de obtener resultados que garanticen una gran precisión en el conformado.

En primer lugar, es conveniente tener presente las complejas reacciones que ocurren en los metales en caso de producirse cambios en la microestructura. Se van a establecer comparaciones entre el conformado en caliente y en frío, en ambos procesos pueden llegar a darse cambios en la microestructura del metal. Para los aceros estructurales se suelen producir únicamente cuando se encuentran en situaciones de elevadas temperaturas. Un esquema comúnmente empleado para ilustrar estas complejas reacciones en los metales se puede observar en la Ilustración 5, en el que los cambios y transformaciones pueden generar reacciones en ambos sentidos.

Por ejemplo, los cambios en la temperatura pueden inducir tensiones térmicas y generar cambios microestructural. También, puede ocurrir que se produzca calor por deformación debido a los esfuerzos mecánicos o bien se produzcan cambios de microestructura que requieran de calor latente para su transformación, lo que afectaría al campo de temperaturas.



**Ilustración 5. Esquema de relaciones entre campos térmicos, tensionales y microestructurales en metales[2].**

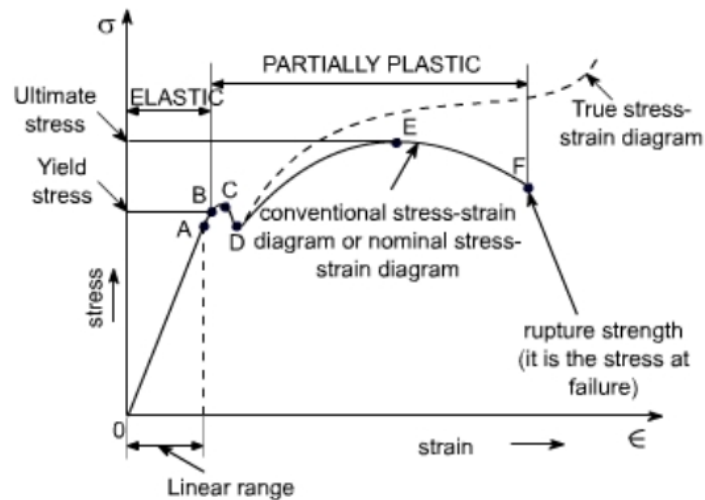
La única forma de conformar el metal, es decir, conseguir una forma deseada sin realizar procesos de fundición, la única opción es mediante la deformación plástica del metal. Para ello, los procesos de conformado son necesario el estudio de la teoría de la plasticidad [3] y esto conlleva que las simulaciones numéricas sean no lineales y en el caso de elementos finitos las ecuaciones del material deberán ser capaces de representar las deformaciones plásticas.

### ***2.4.1. Deformación plástica***

Los átomos de los metales tienden a ocupar posiciones determinadas dentro de la red cristalina, que vienen dadas por fuerzas internas de cohesión. El sólido metálico ante un impulso exterior experimenta modificaciones en estado de equilibrio, lo que da lugar a desplazamientos de los átomos [3]. Estos desplazamientos dan lugar a deformaciones a nivel macroscópico. Estas deformaciones se pueden clasificar en dos tipos:

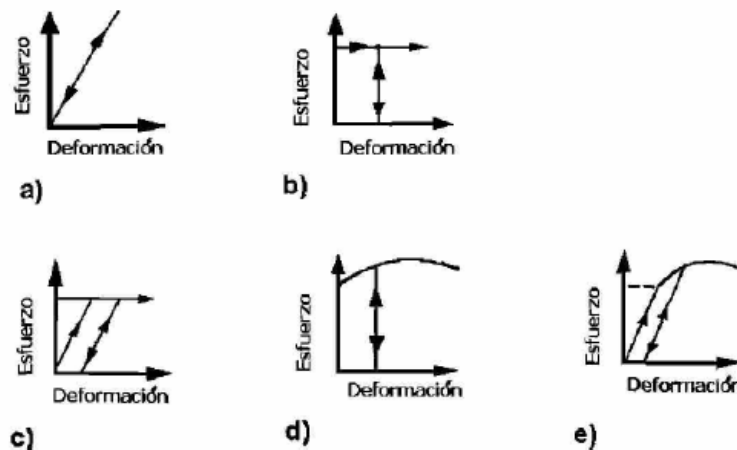
- Elásticas: que se recuperan debido a que vuelven a su posición de equilibrio original, cuando cesan las fuerzas que generaban la deformación. Es importante su influencia en los efectos de “springback” o rebote elástico en el conformado.
- Plásticas: son deformaciones permanentes, que se pretenden conseguir sobre la pieza conformada.

A continuación, se muestra en la Ilustración 6 un ejemplo de la curva – tensión deformación de un acero.



**Ilustración 6.** Curvas tensión-deformación real e ingenieril típicas del acero [4].

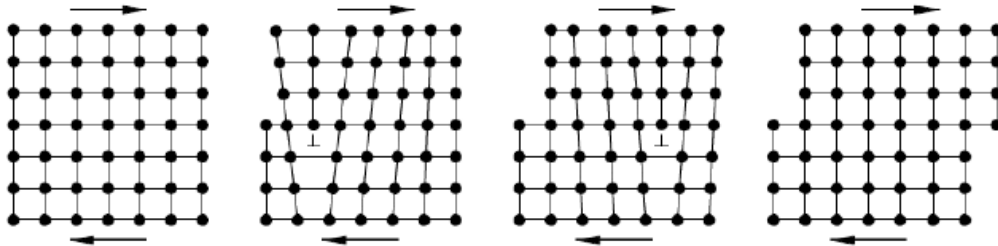
Las tensiones ingenieriles se obtienen de forma experimental de forma directa a partir de ensayos a tracción. A la hora de generar el modelizar este comportamiento es común simplificar la parte elástica o plástica, tanto en métodos analíticos como numéricos. Se puede ver en la Ilustración 7 los diferentes modos idealizados del comportamiento en tensión-deformación de metales.



**Ilustración 7.** Curvas ideales de tensión deformación: (a) perfectamente elástico, (b) rígido perfectamente plástico (c) elástico perfectamente plástico (d) rígido con endurecimiento por deformación, (e) elástico con endurecimiento por deformación [5].

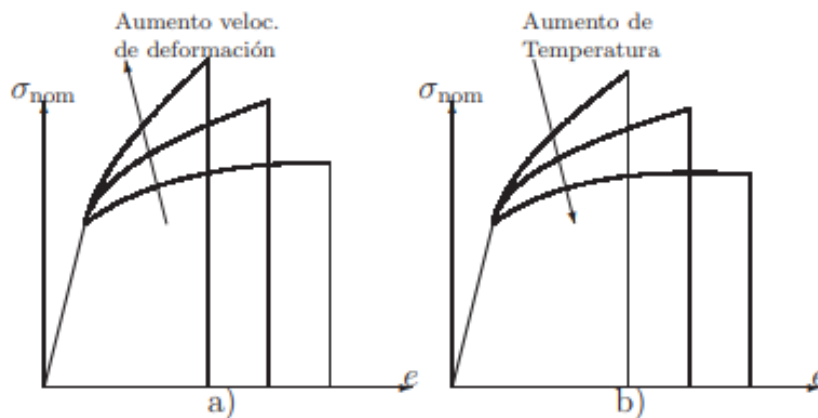
Los planos atómicos en su conjunto requieren teóricamente un elevado esfuerzo para su desplazamiento, las deformaciones se generan realmente en los metales a tensiones inferiores. Esto es debido a debilidades a la existencia de defectos lineales denominados dislocaciones y que facilitan el movimiento de los átomos y zonas de cristal bajo la acción de fuerzas externas. En la Ilustración 8 se representa el movimiento de dislocación en la red cristalina. En los metales la realidad es más compleja al encontrarse formados por muchos cristales unidos por los

bordes de grano que dificultan un movimiento libre de las dislocaciones, además en muchos metales se generan precipitados con la finalidad de endurecerlos y que puedan interactuar con las dislocaciones.



**Ilustración 8.** Movimiento de una dislocación en la red cristalina [6].

Durante el conformado, es importante considerar el efecto de la temperatura y de la velocidad de deformación sobre la curva tensión – deformación. En el caso de la temperatura, hablando en términos generales, el aumento de la misma produce una mayor ductilidad, reduciendo el límite elástico. Sin embargo, en la Ilustración 9 aumentando la velocidad de deformación, y por lo tanto la velocidad de aplicación de las cargas externas, lleva dispuesto un endurecimiento y por tanto el material se vuelve menos dúctil.



**Ilustración 9.** Influencia de la velocidad de deformación a) y de la temperatura b) sobre la curva tensión deformación [3].

### **2.4.2. Conformado en frío**

El conformado en frío es la obtención de deformaciones plásticas trabajando con temperaturas inferiores a la temperatura de cristalización. Se debe tener en cuenta que la microestructura puede verse alterada en los aceros, aunque no se haya llegado a alcanzar la temperatura de transformación austenítica. Los métodos de conformado en frío se han nombrado al inicio del

presente capítulo, para deformación en chapas está más enfocado para no alcanzar la temperatura de recrystalización de los aceros y por lo tanto todos ellos son de conformado en frío, si bien las tensiones pueden venir de la contracción térmica.

Además, al trabajar el metal a temperaturas superiores a la ambiental permite una mayor ductilidad, como comentábamos anteriormente, esto nos facilita obtener una forma deseada. En la Tabla 1 se describen las principales ventajas e inconvenientes respecto al conformado en caliente.

**Tabla 1. Ventajas e inconvenientes del conformado en frío frente a caliente [3].**

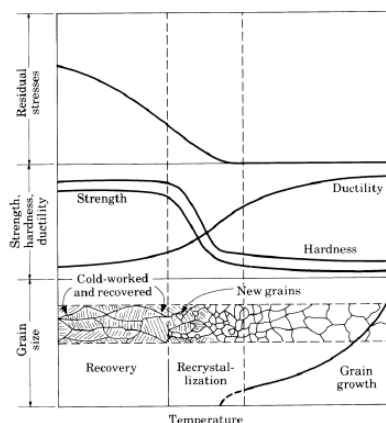
<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Mejores acabados superficiales y tolerancias dimensionales	Mayor necesidad de aplicación de fuerza debida al endurecimiento (equipo más pesado).
Mejores propiedades mecánicas (mayor límite elástico)	Menor ductilidad final
Mejor reproducibilidad	Necesidad de superficies limpias iniciales
Resulta un material anisótropo sin tratamiento térmico (donde sea una ventaja)	Resulta un material anisótropo sin tratamiento térmico (donde sea una desventaja)
	Genera tensiones residuales si no se da un tratamiento de recocido

Como se ha comentado el efecto que tiene el calentamiento a los tratamientos térmicos, permitiendo el alivio de tensiones residuales. El aumento de la temperatura da lugar a tres etapas en orden creciente que se dan de forma progresiva [3]:

- Recuperación: en esta primera etapa van desapareciendo en el metal las tensiones residuales y disminuye ligeramente el límite elástico y la dureza.
- Recrystalización: se forman nuevos cristales en la red cristalina entre los ya existentes deformados. A partir de una temperatura aparecen gérmenes en los límites de grano, maclas y planos de deslizamiento que crecerán con el incremento de temperatura. Las propiedades del metal se ven alteradas y en el caso de piezas conformadas en frío se tiende a recuperar de forma progresiva a recuperar los valores iniciales de ductilidad y límite elástico.
- Crecimiento de grano: superada la temperatura de recrystalización, el nuevo grano generado de la recrystalización continúa su crecimiento con la temperatura.

En la Ilustración 10 se puede observar las diferentes etapas junto a sus efectos para temperatura creciente.





**Ilustración 10. Efectos de las etapas de restauración, recristalización y crecimiento de grano en las propiedades mecánicas y microestructura del metal [3].**

### **2.4.3. Conformado en Caliente**

El conformado en caliente, es en el que es necesario tener la temperatura de trabajo debe encontrarse por encima de la temperatura de recristalización si bien no debe exceder la temperatura de fusión, que ya no permite pasar a estado líquido. Los trabajos en forja y de laminación en caliente sirven de ejemplo. En la siguiente Tabla 2, se describen las principales ventajas e inconvenientes respecto al conformado en caliente.

**Tabla 2. Ventajas e inconvenientes del conformado en caliente respecto al frío [3].**

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Misma deformación con menores esfuerzos.	Oxidación rápida y mal acabado superficial
Permite obtener grano más fino y material más dúctil.	Tolerancias dimensionales amplias (2-5%) por dilataciones térmicas
Permite obtener materiales de mejor tenacidad	Maquinaria de trabajo en caliente costosa
Se pueden obtener mayores deformaciones	Mantenimiento de la maquinaria importante
Mayor homogeneidad del material (sin impurezas)	Trabajos de mayor riesgo para los operarios
Ausencia de tensiones residuales	Mayor densidad (donde sea una desventaja)
Mayor densidad (donde sea ventajoso)	
Estructura fibrosa con mayor resistencia mecánica en la dirección de la fibra	

## **2.5. CONFORMADO MECANICO**

A lo largo de este punto se van a describir los principales métodos de conformado mecánico, fundamentalmente se basa en la aplicación de esfuerzos mecánicos sobre el componente o la pieza con el fin de darle una forma deseada ya sea a temperatura ambiente o incrementándola para lograr obtener una mayor ductilidad. Como se ha comentado en puntos anteriores, todos los conformados mecánicos se realizan “en frío”, siempre temperaturas por debajo de la de recristalización del acero.

El método más utilizado en la actualidad para el curvado de chapas es el Stretch Bending. Esta tecnología está madura y consiste en utilizar rodillos o cuñas para doblar las chapas. Se trata de una curvadora y utiliza rodillos y cuñas, se trata de una plegadora. Esta tecnología extendida permite realizar cilindros o conos, pero no permite la realización de esferas o figuras con curvaturas simultáneas en diferentes direcciones.

El estampado permite superar la limitación de las curvadoras y las plegadoras. El estampado utiliza moldes y prensas movidas por actuadores hidráulicos. Las curvaturas deseadas para las chapas están grabadas en los moldes. El precio de los juegos de moldes suele ser el coste que condiciona el uso de esta técnica de forma que solo es rentable para producción en serie.

### **2.5.1. Prensado por aplicación repetitiva**

Este tipo de conformado de chapas es empleado actualmente en la industria naval. Este proceso requiere una mano de obra altamente cualificada para la obtención de chapas con este conformado tridimensional. Consiste en la aplicación de cargas mediante una prensa y respectivamente ir moviendo la chapa para que la fuerza se aplique en diferentes puntos a lo largo de la geometría [9]. Este método de conformado requiere de una comprobación mediante el uso de plantillas de control, para ver si se ha logrado la forma deseada. Todo el proceso depende en gran medida de la experiencia del operario. Tiene elevados costes en tiempo y dado que se hace de forma no sistemática se suelen confeccionar piezas únicas. Por este motivo, apenas existe repetitividad en el proceso. Se desconoce la distribución de tensiones residuales. En la Ilustración 11 se muestran dos imágenes de este proceso. En la Tabla 3, vienen las ventajas y desventajas que nos encontramos al realizar este conformado.



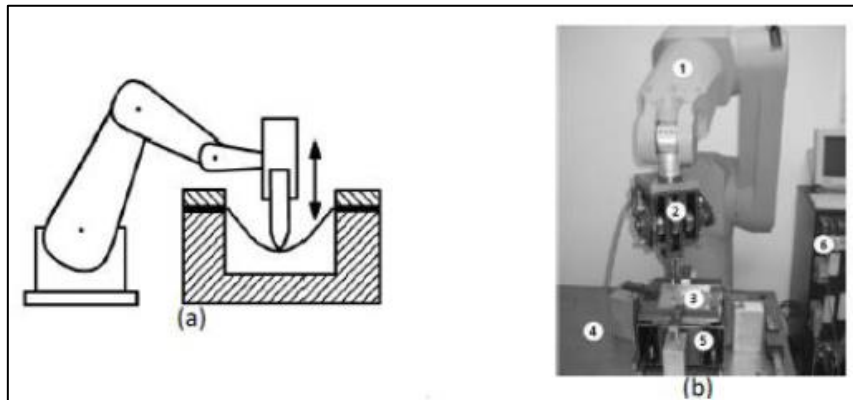
**Ilustración 11.** Verificación dimensional con plantillas (izqda.) y aplicación de la carga durante el proceso (Dcha.)

**Tabla 3.** Ventajas e inconvenientes del prensado por aplicación repetitiva [3].

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Adaptación a la geometría de doble curvatura	Lentitud y alto coste económico por pieza
No requiere inversión en maquinaria específica.	Mano de obra muy especializada
Capaz de solucionar no conformidad a la geometría	Baja repetitividad
Implementado en la industria naval.	Control de calidad manual mediante plantillas.
Aplicable con adaptaciones a otros metales como aluminio	Si no hay tratamiento térmico, altera la curva tensión deformación del material y genera tensiones residuales.
Alta dependencia de la pericia del operador	

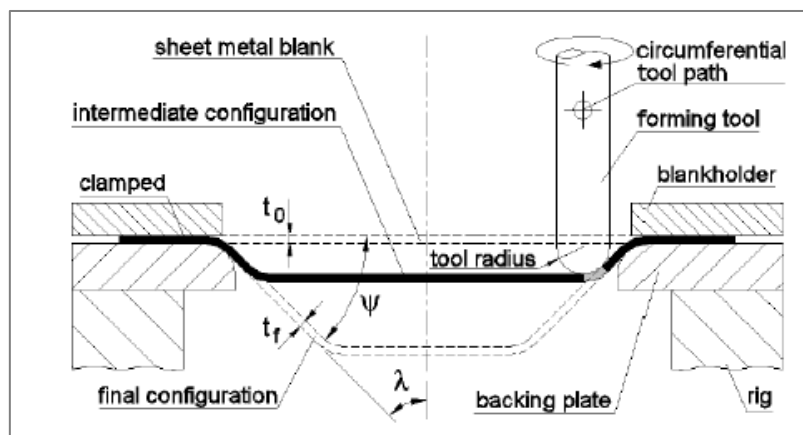
### ***2.5.2. Single Point Forming – Robot Forming***

El funcionamiento de esta técnica consiste en lograr la deformación mediante golpes o ejerciendo presión en un punto de la chapa hasta obtener la forma deseada. Un punzón o un martillo aplican fuerza sobre la pieza a conformar. En el caso de usarse un punzón, el mismo o la pieza rotan de forma que la pieza no recibe golpes. Puede haber, o no molde de respaldo. En la Ilustración 12 [11] se muestra un esquema y una imagen del conformado mediante el uso de martillo. Cuando se usan robots industriales en el proceso se les denomina Robot-Forming.



**Ilustración 12. Esquemas de Single Point Forming [11].**

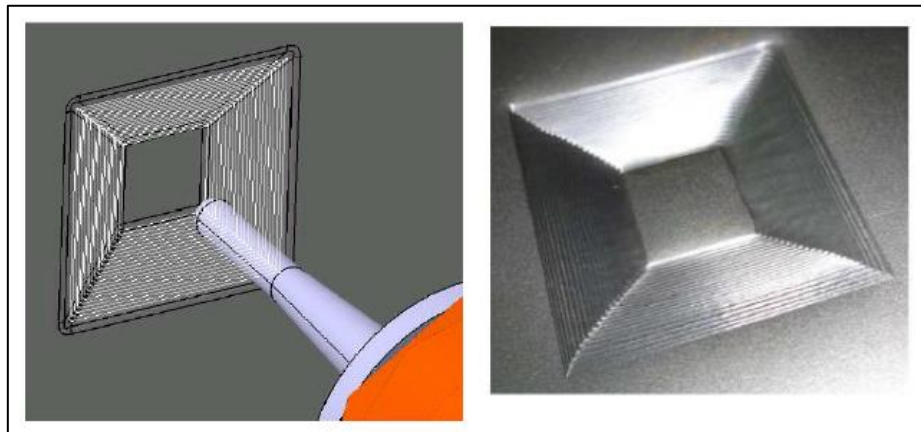
En el caso de Single Point Forming, la deformación deseada se consigue en una sola etapa. Si la deformación se consigue mediante etapas con deformaciones incrementales, el método se denomina Single Point Incremental Forming (SPIF). El Dieless Forming es una clase de Single Point Incremental Forming. La Ilustración 13 muestra un esquema de SPIF. Existe una técnica similar que utiliza una herramienta como contraparte (double point) para deformar la chapa también desde la otra cara, con esta posibilidad se pueden dar doble curvatura a las chapas.



**Ilustración 13. Esquema de Single Point Incremental Forming [11].**

Estas técnicas permiten conseguir formas muy diversas, sin embargo, tienen gran dependencia respecto a la pericia del operador de máquina [12].

En el caso del Robot-Forming, esta dependencia puede ser superada si se programa al robot para ser capaz de ir corrigiendo el exceso o defecto de deformación producido o con algoritmos de aprendizaje [13]. Una comparación entre la pieza simulada en un sistema CAD de dibujo asistido y la pieza terminada en el experimento se muestra en la Ilustración 14.



**Ilustración 14.** Modelo 3D del proceso de conformado en programa de diseño (izqda.) y pieza acabada (dcha.)[13].

A continuación, se describen en la Tabla 4 las principales ventajas e inconvenientes para el curvado de chapas mediante el uso del Single Point Incremental.

**Tabla 4.** Ventajas e inconvenientes del Single Point Incremental Forming[11].

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Producción de piezas directamente dadas por ficheros CAD	Mayor tiempo de conformado frente a estampado
No precisa de molde o troquel	Limitado a producción de pequeñas cantidades
Dada la naturaleza incremental, las fuerzas son relativamente pequeñas	El rebote elástico ocurre, pudiendo minimizarse a través de algoritmos.
Aumenta la conformidad del material.	No permite la doble curvatura a menos que se use el doble punto
Puede ser llevado a cabo por una maquina CNC convencional.	Puede perder exactitud en radios pequeños (mm) y convexos y ejes de doblado.
Es posible obtener buenos acabados superficiales	Los ángulos rectos son difíciles de conseguir.

### ***2.5.3. Multipoint Forming***

Este tipo de conformado consiste en gobernar matrices de prensas hidráulicas de forma que cada prensa realiza el movimiento de cada herramienta de conformado. Esta herramienta nos permite dar curvaturas simultáneas con diferentes direcciones en una misma chapa.

Las limitaciones que surgen con esta técnica, es una matriz visible de abolladura sobre la chapa. Para paliar este efecto se ha separado la matriz de abolladuras con láminas de elastómero,

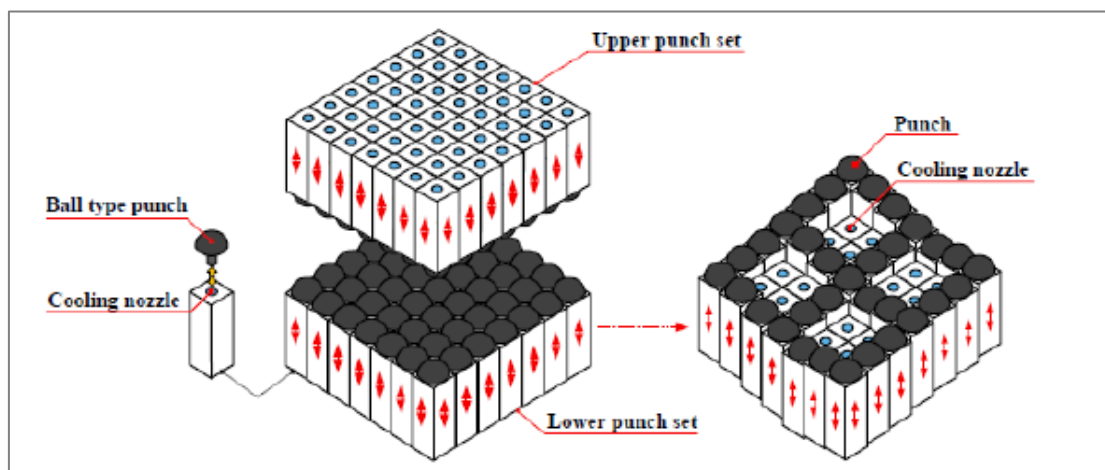
consiguiendo una dispersión y un suavizado de las cargas puntuales. Una gran ventaja de esta técnica es que no requiere un modelo metálico.

### ***2.5.4. Hot Multipoint Forming***

Este tipo de conformado surge como una mejora del conformado de multipunto, descubierto por un grupo de investigadores de Corea del Sur [17]. Con esta mejora lo que se busca es poder realizar mejores curvados en placas de gran espesor aumentando así la velocidad de producción. La idea propuesta es realizar el proceso de conformado en caliente previamente a las chapas y aplicando refrigeración de forma simultánea al conformado. Parte de los actuadores empujaría a los cabezales que presionan a la placa para deformarla. Al resto de los actuadores se les deshabilitaría los cabezales y se convertirían en aspersores de refrigerante.

No hay evidencias de que se haya puesto en práctica, pero los investigadores han presentado resultados de simulaciones para el caso de la fabricación de placas esféricas de aleación de aluminio Al5083-O de 70 mm de espesor. La temperatura de conformado es de 430°C. El radio más pequeño simulado es de 500 mm y para este radio, el error de dimensión producida pronosticado es del 0.48%. Cuanto mayor es la densidad de cabezales, mayor es la precisión del conformado, pero más tiempo necesitaría el proceso para refrigerar la placa.

Las ventajas de este sistema de conformado multipunto es el aumento de la velocidad de producción y un menor error de conformado por reducir la recuperación elástica.



**Ilustración 15. Matrices de herramientas convertibles de Hot Multipoint Forming.**



### **2.5.5. Hydroforming**

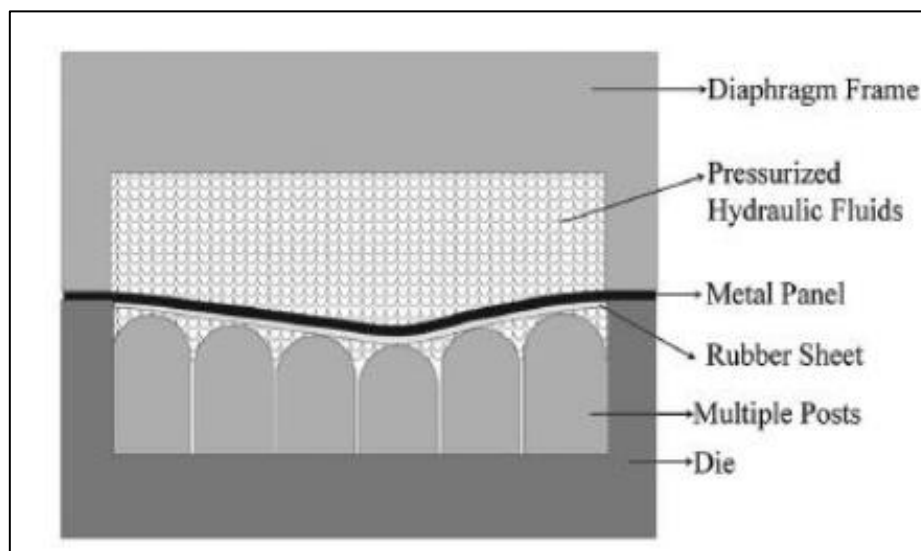
Esta técnica consiste en utilizar la presión de un fluido que actúa sobre una chapa y la deforma hasta que adapte su forma sobre un molde.

Esta técnica produce curvas de gran calidad. Sus limitaciones son el tiempo que se tarda en producir y ajustar un molde y el coste de los mismos preparativos. El tiempo de producción de chapas es mucho menor que el tiempo de los preparativos.

### **2.5.6. Multi-post Hydroforming**

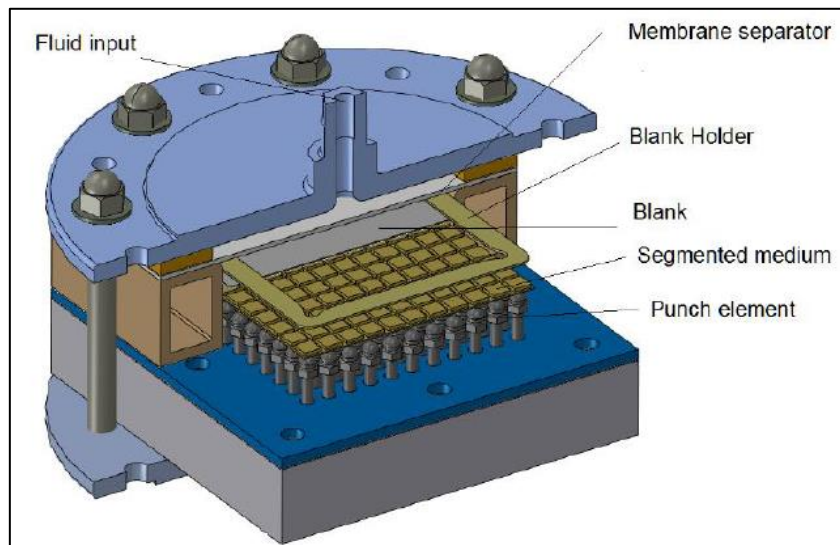
Esta técnica es una combinación del Multipoint Forming y el Hydroforming.

El funcionamiento de esta técnica es una matriz de actuadores que sitúa cabezales que recrean la superficie deseada y un fluido a presión se encarga de empujar la chapa contra la matriz de actuadores. Esta técnica fue probada para la construcción del edificio Dongdaemun Design Park en Corea del Sur [17]. La técnica fue descartada debido a que las chapas mostraban muchas abolladuras. En la Ilustración 16, se puede observar un esquema de esta técnica de conformado.



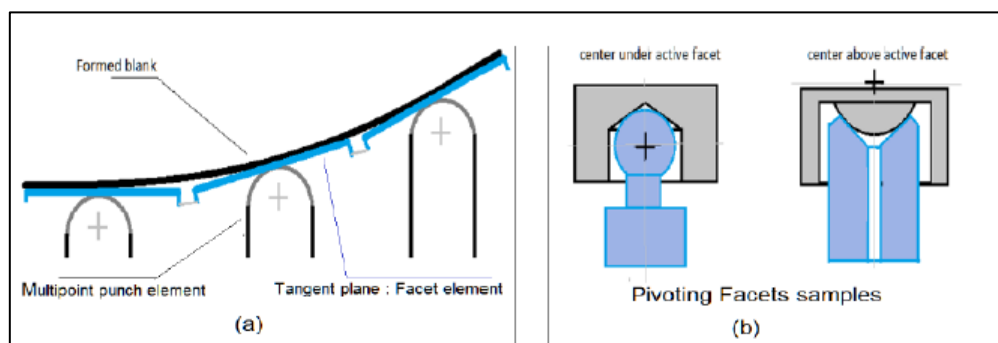
**Ilustración 16. Esquema del experimento de Multiple-post Hydroforming.**

La universidad de Monastir, en Túnez [20], ha realizado una investigación aplicada sobre la combinación del Hydroforming y Multipoint Forming con la intención de reducir las abolladuras. Para ello, han realizado maquinaria que sitúa una capa dotada de teselas en relieve. Cada tesela tiene una superficie plana que contactara con la placa para curvar. En la Ilustración 17, se muestra un corte de una vista en perspectiva de la maquina utilizada.



**Ilustración 17.** Esquema de la máquina de hydroforming y multipoint forming combinados.

La Ilustración 18 muestra como las teselas adaptan su inclinación a la superficie de la placa gracias a las rotulas de los cabezales de los actuadores del colchón de Multipoint Forming.



**Ilustración 18.** Sección de teselas y actuadores.

El teselado permite crear una red de 121 elementos cuadrados que conforman el respaldo de la placa. La presión del agua ayuda a empujar una membrana que mantiene la estanqueidad. La membrana es quien presiona a la placa hasta que la deformación se ajuste a la red de teselas. El experimento de la Universidad de Monastir aplicaba pasos de 10 mm entre cabezales de los posicionadores. Fruto de la realización de estos ensayos consiguieron placas de aluminio curvadas de espesor de 2 y 0.5 mm. Los analistas observaron abolladuras en la placa de 0.5 mm de espesor.



### ***2.5.7. Explosive Forming***

Esta forma de producir es como el Hydroforming y añade como peculiaridad que la presión del fluido es provocada por la explosión de un material detonante sumergido.

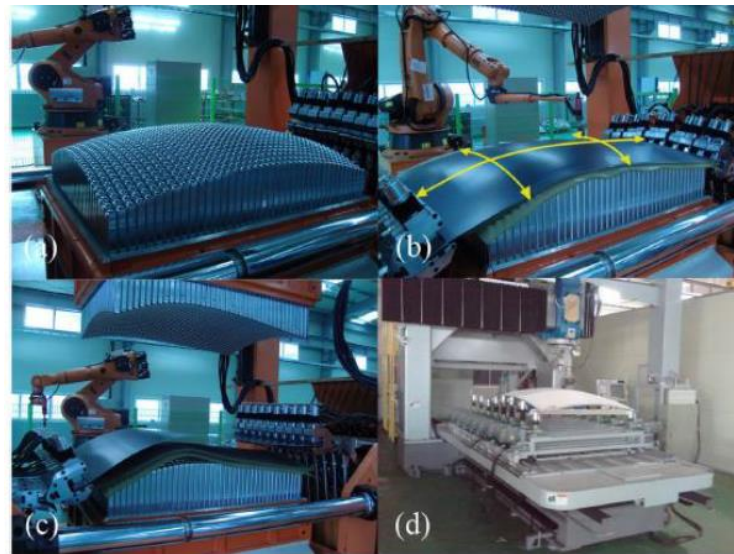
Esta técnica es mejor que la anterior si el material requiere que el proceso de deformación que se realice rápido. La calidad del producto no es tan buena como el hidro-conformado y además cuenta con las mismas limitaciones de tiempo y coste para los preparativos de un molde.

### ***2.5.8. Multipoint Stretch Forming***

Esta técnica de conformado mecánico combina Multipoint Forming y el Stretch Bending. Esta técnica de conformado mecánico se utilizó con éxito en la construcción del edificio Dongdaemun Design Park en Corea del Sur [17]. En la Ilustración 19 muestra la maquinaria utilizada en ese caso.

El funcionamiento de esta máquina es mediante el uso de una matriz de actuadores que actúan como un molde. En el caso en los que se es requerida una curvatura sencilla, que tenga como mucho dos direcciones de curvatura. Un grupo de mordazas entran en acción estirando la chapa a lo largo de una matriz, seguidamente una herramienta presiona una chapa sobre la matriz con un funcionamiento similar al de un rodillo. Esto se puede observar en la Ilustración 19 (B).

En los casos en la que la curva es complicada, entonces otra matriz de actuadores realizara la presión sobre la chapa por el lado contrario al de la primera matriz. Esto se observa en la Ilustración 19 (C). Se requiere la realizar un recorte perimetral para el correcto encaje entre chapas, lo cual se muestra en la Ilustración 19 (D).



**Ilustración 19. Máquinas de Multipoint Stretch Forming.**

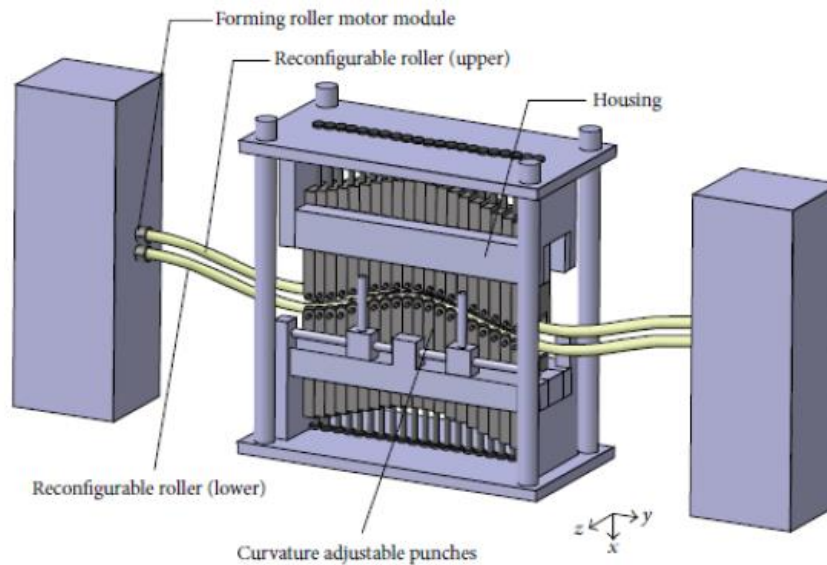
En la construcción del Dongdaemun Design Park se consiguió el uso de este método con éxito, se automatizó e informatizó el proceso de forma que los archivos informáticos de programación especializados y maduros podían usarse para programar la posición de los actuadores y de los robots. Debido a esto, la ingeniera consiguió un gran avance en el proceso robotizado, logrando aumentar la velocidad para entregar a tiempo las chapas para su uso en la obra.

### ***2.5.9. Flexibly Reconfigurable Roll Forming***

La técnica de conformado mediante rodillos de flexibilidad reconfigurables permite realizar muchas curvas diferentes sin necesidad de preparar moldes. Este método utiliza actuadores alineados en dos filas. Todos los actuadores empujan los tubos que amordazan a la placa que se va a curvar. Los tubos toman la forma de la curva transversal de la chapa.

La ventaja que supone este sistema reside en que evita las abolladuras que deja el método Multipoint Forming, es debido al refuerzo mediante un tratamiento superficial.

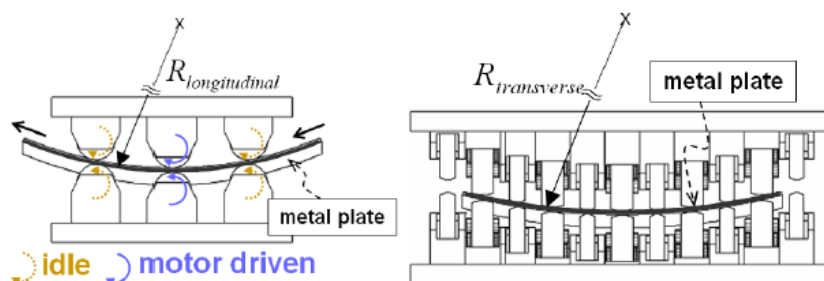
En la Ilustración 20 muestra un modelo del conformado mediante rodillos de flexibilidad reconfigurable [19]. El lector permite percibir que los tubos encargados de presionar a la chapa tienen una silueta suavizada y eso evita las abolladuras.



**Ilustración 20.** Modelo de conformado mediante rodillos de flexibilidad reconfigurable.

### **2.5.10. Curvado con sistema de rodillos LARS**

El sistema LARS<sup>2</sup> es un sistema mecánico que permite dar una curvatura tanto en sentido longitudinal como transversal dejando una forma similar a una curvadora de cilindros [24][25]. El prototipo desarrollado por un grupo de investigadores Sur-Coreanos de la empresa Daewoo Shipbuilding consiste en tres filas de rodillos que permiten el movimiento individual para cada grupo longitudinal. La fila central es la que proporciona el movimiento y está impulsada por un motor. El conformado de la chapa se puede realizar en una sola etapa o en varias (multietapa), siendo esta última la más recomendable por ser menor el movimiento transversal y ser adecuado para reducir el efecto rebote elástico. Al realizar múltiples pasadas permite ir controlando la deformación de la chapa hasta lograr obtener la forma final deseada. En la Ilustración 21 se puede observar un esquema del funcionamiento para el doble curvado.



**Ilustración 21.** Esquema del principio de deformación por doble flexión del sistema LARS [24].

<sup>2</sup> LARS (Line Array Roll Set)

En la investigación se demuestra que es capaz de dar formas de doble curvatura, con errores máximos de 3 mm. Hasta ahora, el prototipo ha logrado conformados de acero con espesores de 6 – 10 mm. En la Ilustración 22 se muestra una imagen del prototipo.



**Ilustración 22. Prototipo del sistema LARS[24].**

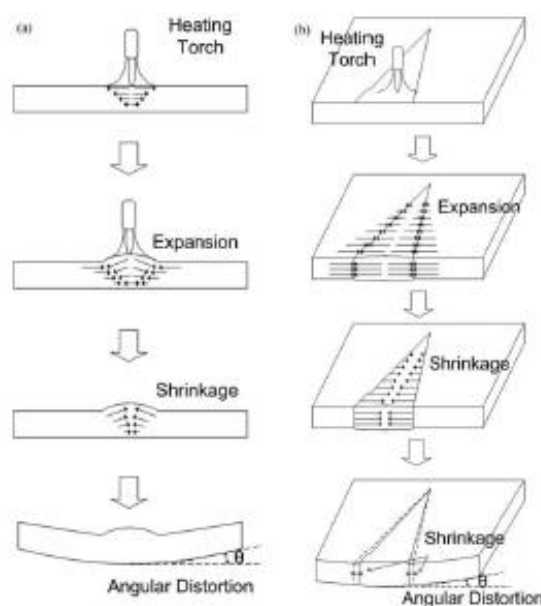
## **2.6. CONFORMADO TERMICO**

A lo largo de este punto se van a describir los principales métodos de conformado térmico, consiste en obtener las tensiones para dar forma al metal elevando la temperatura a lo que posteriormente se realiza un enfriamiento de la pieza. Es similar al conformado mecánico ya que no es recomendable alcanzar temperaturas de recristalización, si bien se han observado modificaciones sobre la microestructura del metal (y por lo tanto de sus propiedades)[1].

A continuación, en los siguientes apartado se explicarán los tipos de conformado térmicos clasificados en función de la fuente de calor a utilizar y su grado de automatización.

### **2.6.1. Curvado por llama-manual**

Esta técnica consiste en la aplicación de calor con una antorcha en la que se realiza la combustión de un gas con aporte de oxígeno controlada por un operario experto en una cada de la chapa generando el doblado de la chapa al enfriarse. Es la contracción la que genera las tensiones en la chapa que producen la deformación plástica. El gas combustible puede ser acetileno, propano, propano u otras mezclas de gases. Una de las formas de obtener una mayor curvatura es el enfriado mediante el uso de un chorro de agua tras la aplicación del calor de la llama. En la Ilustración 23 se muestra el fenómeno que genera las distorsiones en la chapa y en la que la contracción de las fibras superiores del metal se ven limitadas por el metal que no se ha visto afectado, traccionándolas.



**Ilustración 23. Líneas de calor y triángulos de calor**

En la misma ilustración se puede ver tanto la técnica de la línea (a) como por triángulos (b), ambas técnicas por aplicación de la llama. Para la finalización del proceso puede ser necesario voltear la chapa y aplicar calor por la otra cara. Se realizan varias líneas de calor hasta llegar al resultado final que verifica mediante el uso de plantillas. En la Ilustración 24 se muestran los diferentes pasos que se repiten hasta obtener el curvado mediante uso de esta técnica.



**Ilustración 24. Etapas del proceso de curvado mediante líneas de calor (manual).**

El método de enderezado por llama es totalmente equivalente. La diferencia es que se emplea para la corrección de curvaturas no deseadas, y se aplica también sobre perfiles metálicos.

A continuación, se muestran una serie de gráficos y datos que nos servirá de guía para entender mejor la técnica de líneas de calor.

### **THE NATIONAL SHIPBUILDING RESEARCH PROGRAM – LINE HEATING[21].**

Este documento<sup>3</sup> [21] expone dos experimentos realizados con la intención de demostrar la relación de parámetros de operación con los resultados de curvado.

El *primer experimento* propuesto es el más antiguo que el libro y fue documentado por primera vez en 1961. Este experimento consiste en utilizar una antorcha de acetileno sobre un acero de calidad no indicada en el texto. El experimento consiste en aplicar líneas de calor sobre chapas de dimensiones de 900 x 700 mm manteniendo constante.

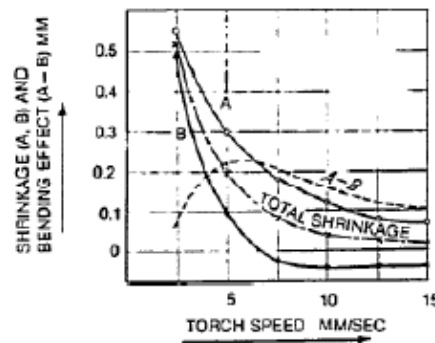
Los resultados de los experimentos indican:

- Diferentes efectos en función de la velocidad de la antorcha. La velocidad lenta inferior a 5 mm/s, hace que ambas caras de la placa sean afectadas por el calor y se obtiene un conformado dominado por la contracción plana. Cuanto menor es la velocidad, mayor será la contracción. A una velocidad de 5 mm/s se producirá máxima diferencia entre la

<sup>3</sup> The National Shipbuilding Research Program – Line Heating.

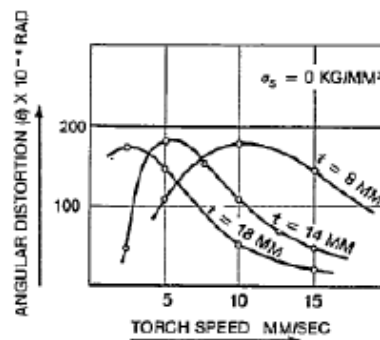


contracción de la cara opuesta de la antorcha. Esta es la situación en la se produce mayor flexión, tal como se indica en la Ilustración 25[21]. Estos fenómenos se observan de forma gráfica en la Ilustración 26.



**FIGURE 1-6:** Bending effect is defined as the difference between shrinkage of the heated side (A) and shrinkage of the other side (B). The shaded area designates the limited useful range of torch speeds at which both acceptable shrinkage and near maximum bending effect are obtainable.

**Ilustración 25.** Contracción en cada superficie en función de la velocidad de la antorcha.



**FIGURE 1-8:** Angular distortion obtained by line heating with no initial stress. The curves, particularly for 14 mm plate thickness, are clearly related to the bending effect shown in Figure 1-6.

**Ilustración 26.** Deformación angular en función de la velocidad de antorcha y del espesor de las placas sin pretensado.

- Una velocidad optima de antorcha para cada espesor de placa si lo que se desea es el curvado: 10mm/s para una placa de espesor de 8 mm, 5 mm/s para una espesor de 14 mm y 2.5 mm /s para una placa de espesor de 18 mm. Los resultados se observan en la Ilustración 26 [21].
- El pretensado aumenta la deformación angular. Este efecto se observa en la Ilustración 27

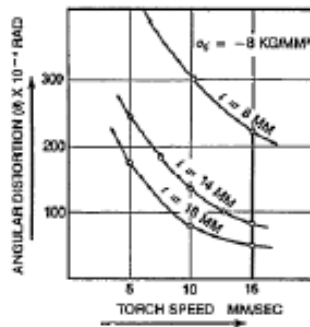


FIGURE 1-9: Angular distortion obtained by applying stress before line heating, is remarkably increased.

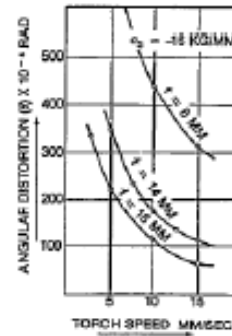


FIGURE 1-10: Greater initial stress as compared to that for Figure 1-9, further increases the angular distortion obtained by line heating.

#### Ilustración 27. Efectos de pretensado sobre la deformación angular.

El *segundo experimento* muestra el efecto que tiene el uso de varias líneas de calor superpuestas entre ellas o cercanas. El resultado de experimento indica que cuando las líneas de calor distan menos de 30 mm, el efecto de las líneas siguientes esta reducido respecto a una líneas aislada. Es decir, la segunda línea de calor curva la chapa menos que la primera, la tercera línea curva menos que la segunda y así sucesivamente. En la Ilustración 28 e Ilustración 29 muestran el cupón de los experimentos y los resultados medidos en porcentajes respecto a la deformación angular conseguida en la primera línea de calor. La distancia entre líneas de calor es el parámetro respecto al se ensaya la reducción de deformación angular mediante la cota  $l$  en la Ilustración 28.

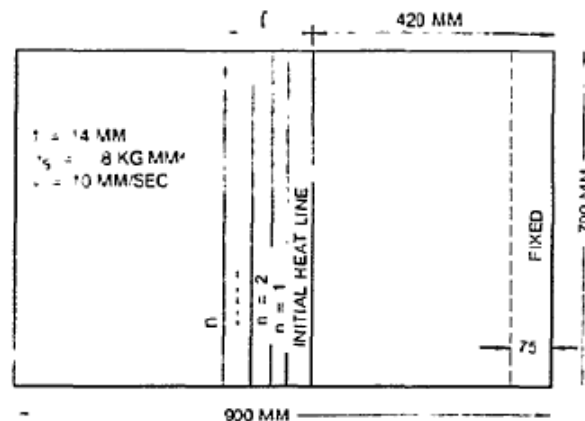


FIGURE 1-12: Method for determining the effect of superimposing and spacing heat lines.

#### Ilustración 28. Cupón de experimento de superposición de líneas de calor.



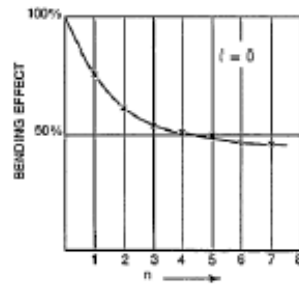


FIGURE I-13: When  $\ell = 0$ , i.e., when heat was superimposed on the same line, there was an appreciable drop in bending effect over the first four heat passes.

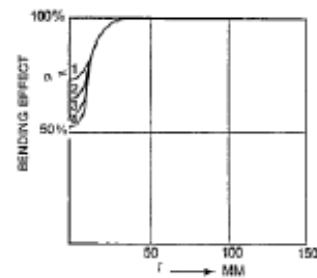


FIGURE I-14: When  $\ell$  was greater than 30 mm, there was no reduction in bending effect caused by up to four subsequent passes.

**Ilustración 29. Reducción de deformación angular en función de distancia entre líneas de calor.**

### 2.6.2. Enderezado por llama

La soldadura es un proceso de fabricación que deja tensiones residuales y deformaciones permanentes en los productos. Las líneas de calor descritas en el apartado anterior pueden utilizarse para corregir los defectos provocados. La empresa BOC<sup>4</sup> Limited, parte de Linde Group ha realizado una guía para el rectificado de formas y para el alivio de la tensión residual mediante el uso de llama. Es posible extraer conocimientos útiles para el curvado a partir de esta guía.

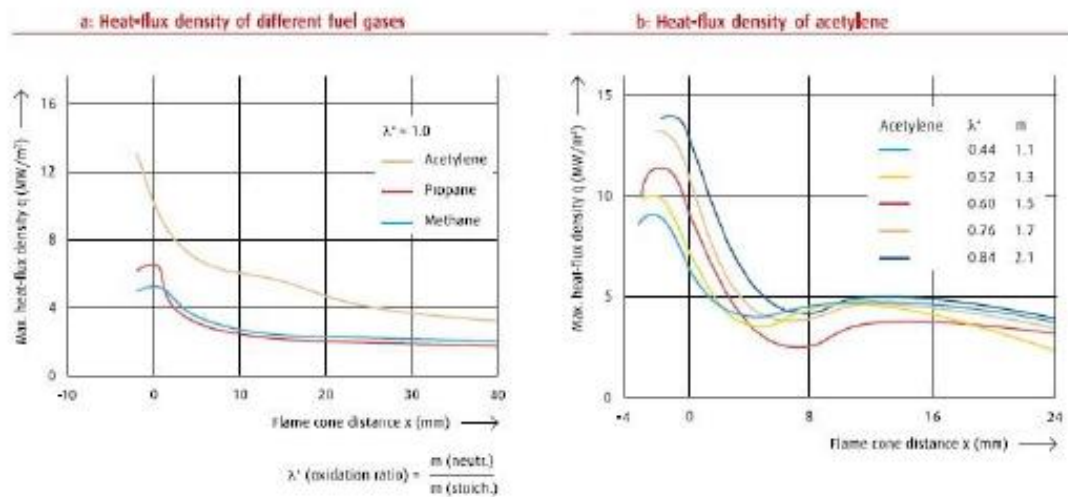
BOC indica que las placas de espesor hasta 25 mm pueden ser rectificadas con lanzas de una única llama. Para espesores mayores, BOC ha preparado antorchas de varios cabezales y carro que desplazan varias antorchas para disparar de una llama de forma simultánea. En la Tabla 5, se observa un resumen para aceros estructurales al carbono de las temperaturas recomendables en función del tipo de acero a corregir.

**Tabla 5. Relación entre temperaturas y clases de acero estructural según BOC.**

Calidad	Margen de temperatura (°C)
S235JR	600 – 800
S355J0	600 – 800
S355N	550 – 700
S890QL	550 – 700
S355M	550 – 700
S460M	550 – 700

<sup>4</sup> BOC : British Oxygen Company

La guía indica que la mezcla de oxígeno y acetileno es preferible frente a las mezclas con propano y propano. En la Ilustración 30 (a) muestra que la mezcla de acetileno y oxígeno es la que experimenta mayor flujo de calor. Un mayor flujo de calor favorece el proceso de contracción de la línea de calor. Para que la línea de calor funcione bien, es preciso conseguir gradientes térmicos grandes en el espesor de la traca y que experimenten cambios bruscos. Con los otros dos gases, es necesario producir una llama de mayor tamaño para llegar a la misma temperatura y eso calienta zonas adyacentes. En ese caso el gradiente térmico será más suave y el curvado será menor. La Ilustración 30 (b), muestra que el aumento de concentración de acetileno consigue mayor flujo de calor.



**Ilustración 30. Mezclas de llamas y flujo térmico.**

Por otro lado, la guía indica que el acero al carbono necesita ser protegido contra el sobrecalentamiento. Para prevenir esto, es mejor guiar la llama con mezcla en exceso de oxígeno al 50% manteniendo un ligero contacto entre la punta del cono y la superficie de la chapa. En la Ilustración 31 podemos observar algunas recomendaciones de mezcla y composición.

Flame settings and guidance for flame straightening									
- Unsuitable -- Impermissible • Possible + Acceptable ++ Correct									
Material	Flame setting				Flame guidance				
					Distance flame cone to workpiece				
	Excess								
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 0 < 1 %	Neutral	O <sub>2</sub> 30 %	O <sub>2</sub> 50 %					
Mild steel	-	•	+	++	Heating of edge zone*				
Fine-grain structural steel	--	•	+	++	- - - + ++				
TM steel	-	•	+	++					
Boiler sheet metal	-	•	+	++	Heating of lower-lying zones*				
Rail steel	-	•	+	++	++ + + - -				
Austenitic stainless steel	--	-	•	++	+	++	-	--	--
Duplex steel	--	-	•	++	+	++	-	--	--
Aluminium	++	-	--	--	++	+	-	--	--
Aluminium alloys	++	-	--	--	++	+	-	--	--

\*Box highlighted in blue refers to mild steel, fine-grain structural steel, TM steel, boiler sheet metal and rail steel.

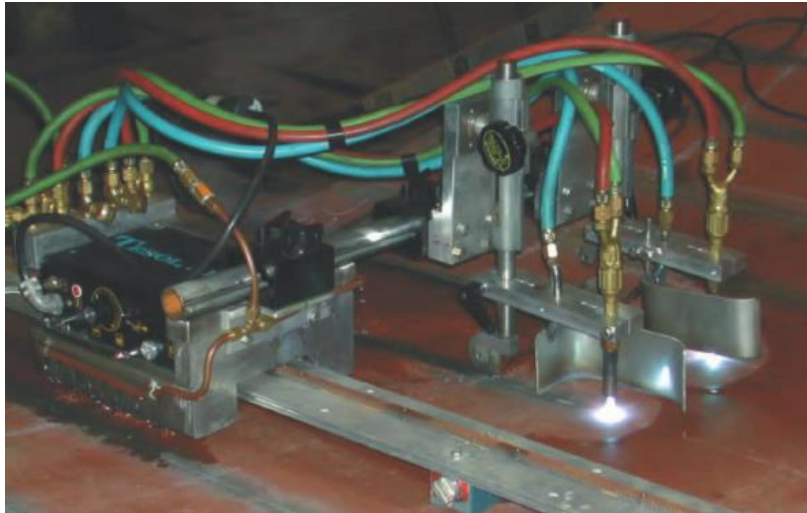
\*Box highlighted in blue refers to mild steel, fine-grain structural steel, TM steel, boiler sheet metal and rail steel.

**Ilustración 31. Mezcla y posición del cono recomendados.**

La guía también nos indica que el diámetro de la boquilla se debe aproximar al espesor de la placa. Aunque otros documentos sugieren que esa igualdad de medidas provocaría la contracción en el plano, pero no generaría la curvatura. Además, recomienda no refrigerar las líneas de calor. Indica que la refrigeración no debe afectar a la zona calentada. La proyección directa de agua o aire comprimido sobre la línea de calor acelera el enfriamiento, pero no garantiza la ejecución de la deformación ni su precisión, y la refrigeración debe ser aplicada sobre las zonas adyacentes.

### 2.6.3. Sistema gobernado

La empresa española Tesol plantea en 2002, un sistema gobernado por un autómata para la aplicación de líneas de calor. Este sistema se muestra en la Ilustración 32 y consta de un sistema de desplazamiento lineal sobre raíles flexibles de aluminio, con regulación de velocidad, dotado de un soporte capaz de llevar 2 antorchas, actuando de modo simultaneo, con alimentación de gases para la llama y de agua de refrigeración independiente para antorcha. Está montado sobre palpadores mecánicos que lo regulan en altura. De este modo, permite una aplicación más uniforme de calor y de refrigeración.



**Ilustración 32. Sistema gobernado de líneas de calor.**

A continuación, se describen los componentes más relevantes del sistema:

- **Carro tractor y railes:** para su desplazamiento se emplea un tractor ligero y robusto montado sobre un rail flexible de aluminio con imanes para su montaje y fijación a la pieza a conformar. La transmisión es realizada mediante un sistema de piñón de cremallera, disponiendo la cremallera sobre el rail flexible. Esto permite adaptarse a los radios de curvatura.
- **Sistema de alimentación de llama y de refrigeración:** está preparado para el suministro de oxígeno y propano y acetileno. El refrigerante es agua y se aplica a través de una cortina por cada llama. Asimismo, consta de un sistema de enfriamiento de unidad tractora para evitar su progresivo calentamiento. La conexión se realiza desde el carro tractor.
- **Sistema de control de altura y porta antorchas:** dispone de un soporte capaz de portar dos llamas con su refrigeración independiente. Tiene un sistema de palpador mecánico que mantiene la altura de la aplicación de la antorcha y sistema de giro que permite adaptarse al cambio de curvatura de la chapa para que la llama se aplique perpendicularmente.

Los inventores estiman un ahorro del 60% del tiempo de aplicación de dos líneas de calor.

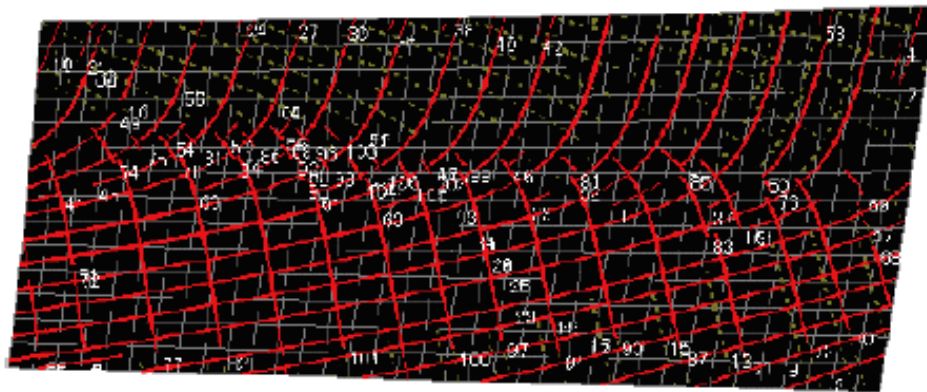
#### ***2.6.4. Curvado por llama – automático***

La industria de construcción naval japonesa desarrollo el primero sistema de automatización de líneas de soldadura en la década de los 90, dicho sistema se la denomino IHI- $\alpha$ . Este sistema que se muestra en la Ilustración 33 y se basa en la automatización del curvado de llama incluyendo

el enfriamiento por agua, las líneas de calor siguen un patrón previamente establecido para el robot (heating plan, se muestra en la Ilustración 34. Era necesario aplicador distintos patrones a cada una de las caras e incorporaba sistemas para tener en cuenta las deformaciones térmicas generadas por las líneas de calor tanto en el plano como fuera de él. El sistema de control del curvado sigue siendo el uso de plantillas.



**Ilustración 33. IHI- α sistema de líneas de calor automático.**



**Ilustración 34. IHI- α patrón de líneas de calor en la cara superior.**

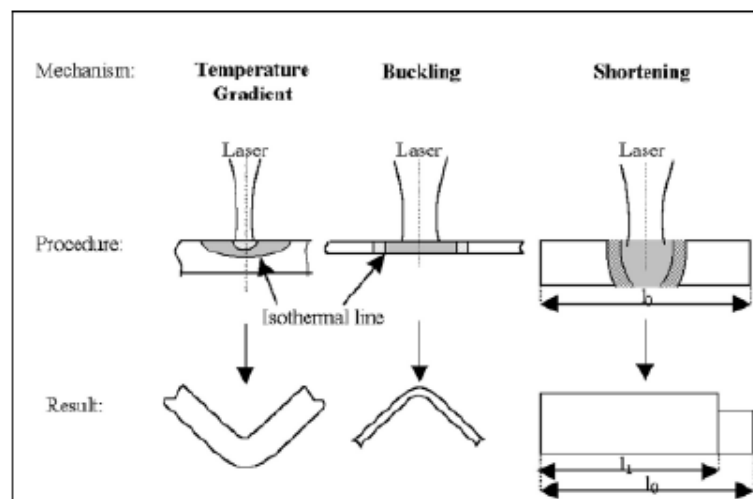
### ***2.6.5. Curvado por laser***

Esta técnica nació con la intención de ser un conformado por líneas de calor que redujera las distorsiones no deseadas generadas por el método de líneas de calor por llama. La graduación de la potencia del láser y su anchura permite dar una variedad de conformados.

Los investigadores de la Universidad de Liverpool defienden que este método permite curvar chapas de gran espesor. Aunque sus experimentos no han tratado chapas de espesor superior a 5

mm, esta universidad defiende el uso de esta técnica para la industria naval de espesor entre 20 y 25 mm.

Entre las acciones posibles del láser que presenta la investigación de la Universidad de Liverpool [18], surgen dos tipos de curvado. El curvado debido al gradiente de temperatura hace que la chapa se curve hacia el origen del láser, similar al curvado por llama. Este proceso se muestra en la columna izquierda de la Ilustración 35. Mientras que el curvado por pandeo genera el curvado en dirección al origen del láser o en sentido contrario, este proceso de curvado se muestra en la columna central de la Ilustración 35. El sentido del curvado dependerá de la orientación de la chapa y el pretensado de la misma. La Ilustración 35, muestra solo un sentido de curvatura para el caso de pandeo, pero en sentido contrario también es posible.



**Ilustración 35. Opciones de conformado asistido por láser.**

La formación con láser se obtiene mediante la deformación plástica inducida por el esfuerzo térmico resultante de los ciclos térmicos no lineales rápidos. A diferencia del conformado mecánico, el proceso no requiere herramientas ni fuerzas externas, y en ese caso no se genera el efecto de recuperación. Se han identificado varios mecanismos para explicar el comportamiento térmico del conformado por láser, teniendo en cuenta diversas geométricas de las piezas, las condiciones del proceso de láser y muchos materiales. Aunque estas interacciones entre los factores térmicos y mecanismos aún no se comprenden completamente, con un mayor conocimiento del proceso de formación por láser, el proceso ofrece un valor potencial significativo para la industria, como la industria aeroespacial, la construcción naval, la microelectrónica, etc. El modelado del proceso de formación del láser puede ayudar a proporcionar una base para determinar el patrón de calentamiento requerido, por lo tanto, la aplicación de la formación con láser es factible y rentable para la industria.



## 2.7. ACERO

Para lograr mantener las propiedades mecánicas del acero, es conveniente evitar que se produzcan cambios metalográficos. Y, además, es conveniente evitar cambios de propiedades magnéticas si el proceso de conformado se realiza el calentamiento por inducción. Por esta razón, es preciso averiguar las temperaturas de los dos tipos de cambio e intentar no superar ninguna.

### 2.7.1. Temperaturas de cambio de fase eutéctico

Una tesis de investigación[30] ha logrado determinar las temperaturas a partir de las cuales se producen cambios eutécticos en el acero en función de la temperatura. Los cambios que es preciso vigilar son los cambios entre microestructuras auténtica, ferrítica y austenítica más ferrítica. Las temperaturas límite, se calculan mediante fórmulas a partir de la composición química. A continuación, se muestran las fórmulas de Andrews, Eldis y Grange para el cálculo de temperaturas límite.

- *Andrews*

$$A_{e3}(^{\circ}\text{C}) = 910 - 203\sqrt{C} - 15.2Ni + 44.7Si + 104V + 31.5Mo + 13.1W - [30Mn - 11Cr + 20Cu - 700P - 400Al - 120As - 400Ti] \quad (1)$$

$$A_{e1}(^{\circ}\text{C}) = 723 - 10.7Mn + 16.9Ni + 29Si + 16.9Cr + 290As + 6.4W \quad (2)$$

- *Eldis [31]*

$$A_{e3}(^{\circ}\text{C}) = 871 - 254.4\sqrt{C} + 14.2Ni + 51.7Si \quad (3)$$

$$A_{e1}(^{\circ}\text{C}) = 712 - 17.8Mn - 19.1Ni + 20.1Si + 11.9 + 9.8 Mo \quad (4)$$

- *Grange [31]*

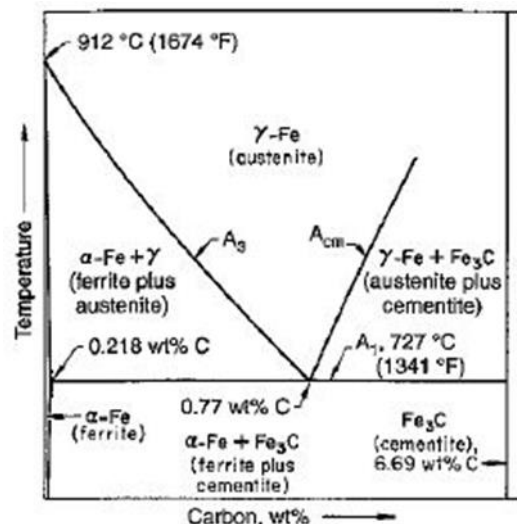
$$A_{e3}(^{\circ}\text{F}) = 1570 - 323C - 25Mn + 80Si - 3Cr - 32Ni \quad (5)$$

$$A_{e1}(^{\circ}\text{F}) = 1333 - 25Mn + 40Si + 42Cr - 26Ni \quad (6)$$

Siendo:

- $A_{e3}$  la temperatura de equilibrio superior. Por encima de esta temperatura, si se alcanza el equilibrio, se transforma todo el acero en austenita.
- $A_{e1}$  la temperatura de equilibrio inferior. Por encima de esta temperatura, si se alcanza el equilibrio, se transforma parte del acero en austenita y otra parte en ferrita.
- Las abreviaturas de elementos químicos son concentraciones de cada uno en tanto por ciento.

Las temperaturas  $A_{e3}$  y  $A_{e1}$  están representadas en la Ilustración 36 [37]. Esta figura muestra un detalle del diagrama de hierro-carbono. Los autores del detalle han indicado estas dos temperaturas como  $A_3$  y  $A_1$  respectivamente.



**Ilustración 36 . Situación de  $A_{e3}$  y  $A_{e1}$  en el diagrama de hierro-carbono.**

Por otro lado, las normas,[27], [28] e [29] indican la composición química de los aceros. Esto permite calcular las temperaturas de equilibrio mediante el uso de las fórmulas presentadas en este apartado. La Tabla 6 muestra las composiciones químicas de varias especificaciones de acero según las normas [27] ,[28] y [29]. La Tabla 7 muestra las temperaturas de equilibrio calculadas.



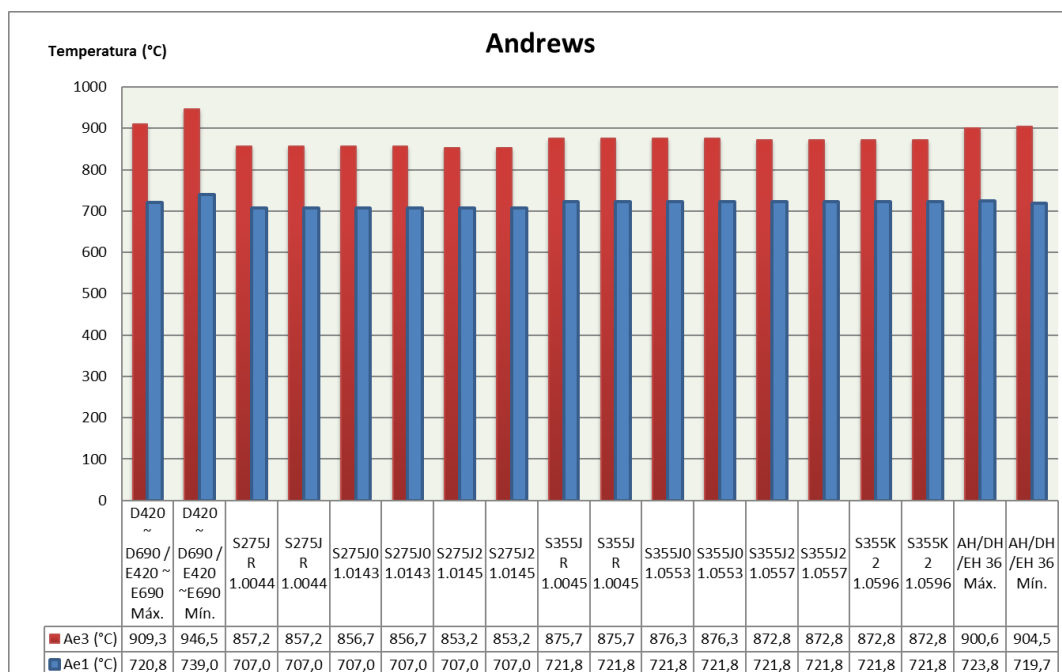
Tabla 6. Composición química según normas

Especificación	Espesor (mm)	Composición química (%)																	
		C	Ni	Si	V	Mo	W	Mn	Cr	Cu	P	Al	As	Ti	S	N	Nb	Ca	P
<b>D420 ~ D690 / E420 ~ E690 Máx.</b>		0.2		0.55	0.1	0.02		1.7			0.03	0.015		0.02	0.03		0.05		0.03
<b>D420 ~ D690 / E420 ~ E690 Mín.</b>		0.2		0.55	0.05						0.03	0.015			0.03		0.02		0.03
<b>S275JR 1.0044</b>	t≤16	0.21						1.5		0.55	0.035				0.035	0.012			0.035
<b>S275JR 1.0044</b>	16<t≤40	0.21						1.5		0.55	0.035				0.035	0.012			0.035
<b>S275J0 1.0143</b>	t≤16	0.18						1.5		0.55	0.03				0.03	0.012			0.03
<b>S275J0 1.0143</b>	16<t≤40	0.18						1.5		0.55	0.03				0.03	0.012			0.03
<b>S275J2 1.0145</b>	t≤16	0.18						1.5		0.55	0.025				0.025				0.025
<b>S275J2 1.0145</b>	16<t≤40	0.18						1.5		0.55	0.025				0.025				0.025
<b>S355JR 1.0045</b>	t≤16	0.24		0.55				1.6		0.55	0.035				0.035	0.012			0.035
<b>S355JR 1.0045</b>	16<t≤40	0.24		0.55				1.6		0.55	0.035				0.035	0.012			0.035
<b>S355J0 1.0553</b>	t≤16	0.2		0.55				1.6		0.55	0.03				0.03	0.012			0.03
<b>S355J0 1.0553</b>	16<t≤40	0.2		0.55				1.6		0.55	0.03				0.03	0.012			0.03
<b>S355J2 1.0557</b>	t≤16	0.2		0.55				1.6		0.55	0.025				0.025				0.025
<b>S355J2 1.0557</b>	16<t≤40	0.2		0.55				1.6		0.55	0.025				0.025				0.025
<b>S355K2 1.0596</b>	t≤16	0.2		0.55				1.6		0.55	0.025				0.025				0.025
<b>S355K2 1.0596</b>	16<t≤40	0.2		0.55				1.6		0.55	0.025				0.025				0.025
<b>AH/DH/EH 36 Máx.</b>	t≤100	0.18	0.4	0.5	0.1	0.08		1.6	0.2	0.35	0.035			0.02	0.035		0.05	0.005	0.035
<b>AH/DH/EH 36 Mín.</b>	t≤100	0.18	0.4	0.1	0.05	0.08		0.9	0.2	0.35	0.035	0.015		0.02	0.035		0.02	0.005	0.035

Tabla 7. Temperaturas de transformación para aceros de normas según Andrews.

Especificación	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	
		A <sub>e3</sub>	A <sub>e1</sub>
<b>D420 ~ D690 / E420 ~ E690 Máx.</b>		909.3	720.8
<b>D420 ~ D690 / E420 ~E690 Mín.</b>		946.5	739.0
<b>S275JR 1.0044</b>	t≤16	857.2	707.0
<b>S275JR 1.0044</b>	16<t≤40	857.2	707.0
<b>S275J0 1.0143</b>	t≤16	856.7	707.0
<b>S275J0 1.0143</b>	16<t≤40	856.7	707.0
<b>S275J2 1.0145</b>	t≤16	853.2	707.0
<b>S275J2 1.0145</b>	16<t≤40	853.2	707.0
<b>S355JR 1.0045</b>	t≤16	875.7	721.8
<b>S355JR 1.0045</b>	16<t≤40	875.7	721.8
<b>S355J0 1.0553</b>	t≤16	876.3	721.8
<b>S355J0 1.0553</b>	16<t≤40	876.3	721.8
<b>S355J2 1.0557</b>	t≤16	872.8	721.8
<b>S355J2 1.0557</b>	16<t≤40	872.8	721.8
<b>S355K2 1.0596</b>	t≤16	872.8	721.8
<b>S355K2 1.0596</b>	16<t≤40	872.8	721.8
<b>AH/DH/EH 36 Máx.</b>	t≤100	900.6	723.8
<b>AH/DH/EH 36 Mín.</b>	t≤100	904.5	719.7

En la se muestra una comparación entre las temperaturas de equilibrio A<sub>e1</sub> y A<sub>e3</sub> calculadas para los aceros especificados por normas según Andrews.



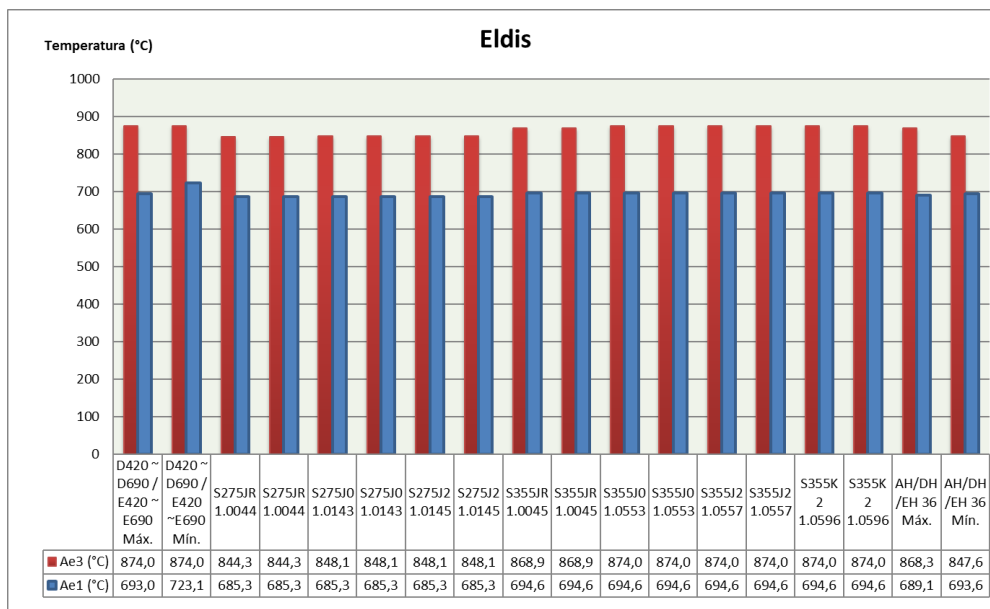
**Ilustración 37. Temperaturas de equilibrio para aceros especificados en normas según Andrews.**

Otros autores como Eldis y Grange [35] han analizado las temperaturas  $A_{e1}$  y  $A_{e3}$ . Los resultados de sus fórmulas están representados en la Tabla 8.

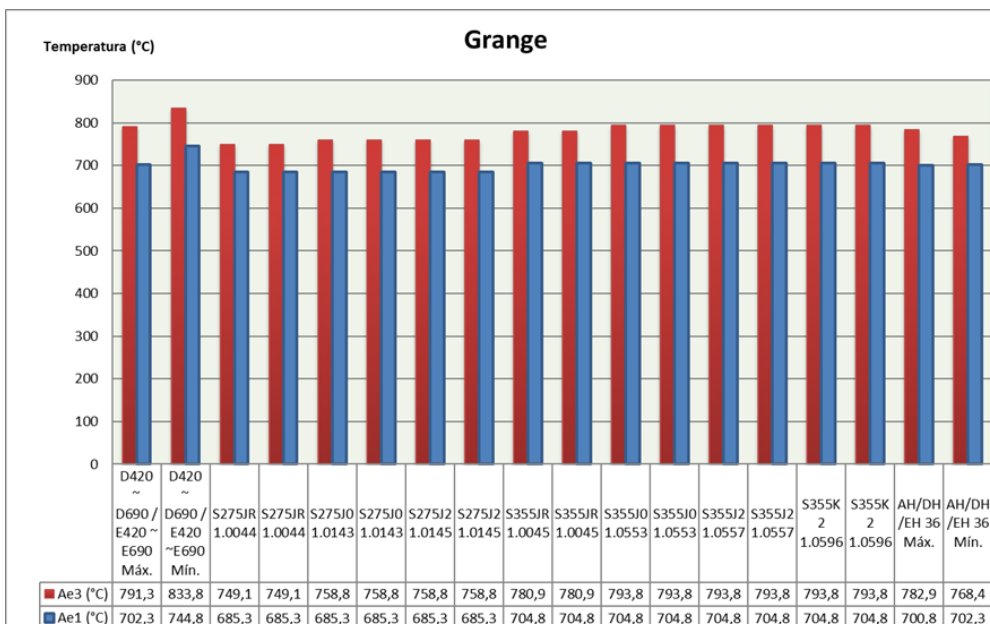
**Tabla 8. Temperaturas de transformación para aceros de normas según Eldis y Grange.**

Especificación	Espesor (mm)	Temperatura (°C)		Temperatura (°C)	
		$A_{e3}$	$A_{e1}$	$A_{e3}$	$A_{e1}$
D420 ~ D690 / E420 ~ E690 Máx.		874.0	693.0	791.3	702.3
D420 ~ D690 / E420 ~ E690 Mín.		874.0	723.1	833.8	744.8
S275JR 1.0044	$t \leq 16$	844.3	685.3	749.1	685.3
S275JR 1.0044	$16 < t \leq 40$	844.3	685.3	749.1	685.3
S275J0 1.0143	$t \leq 16$	848.1	685.3	758.8	685.3
S275J0 1.0143	$16 < t \leq 40$	848.1	685.3	758.8	685.3
S275J2 1.0145	$t \leq 16$	848.1	685.3	758.8	685.3
S275J2 1.0145	$16 < t \leq 40$	848.1	685.3	758.8	685.3
S355JR 1.0045	$t \leq 16$	868.9	694.6	780.9	704.8
S355JR 1.0045	$16 < t \leq 40$	868.9	694.6	780.9	704.8
S355J0 1.0553	$t \leq 16$	874.0	694.6	793.8	704.8
S355J0 1.0553	$16 < t \leq 40$	874.0	694.6	793.8	704.8
S355J2 1.0557	$t \leq 16$	874.0	694.6	793.8	704.8
S355J2 1.0557	$16 < t \leq 40$	874.0	694.6	793.8	704.8
S355K2 1.0596	$t \leq 16$	874.0	694.6	793.8	704.8
S355K2 1.0596	$16 < t \leq 40$	874.0	694.6	793.8	704.8
AH/DH/EH 36 Máx.	$t \leq 100$	868.3	689.1	782.9	700.8
AH/DH/EH 36 Mín.	$t \leq 100$	847.6	693.6	768.4	702.3

La Ilustración 38 e Ilustración 39 se muestra una comparación entre las temperaturas de equilibrio  $A_{e1}$  y  $A_{e3}$  calculadas para los aceros especificados por normas según Eldis y Grange.



**Ilustración 38. Temperaturas de equilibrio para aceros especificados en normas según Eldis.**



**Ilustración 39. Temperaturas de equilibrio para aceros especificados en normas según Grange.**

Las tablas de composiciones químicas tienen algunas celdas vacías, esto es debido a que son datos que no vienen representados en las normas. Según las normas, una misma especificación de acero puede tener diferentes concentraciones de aditivos dentro de un margen. Para estos aceros cuya norma admite margen, las tablas de composición química muestran una línea de

concentraciones mínimas y otra línea de concentraciones máximas. Para aquellos elementos de los que no se muestra concentración mínima, se ha utilizado únicamente la indicada en la norma.

A parte de  $A_{e1}$  y  $A_{e3}$ , conviene vigilar otras temperaturas de transición que son  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ , siendo:

- $A_{c1}$  la temperatura a la cual se inicia la aparición de bandas de austenita durante un calentamiento. Las zonas que son ricas en carbono son transformadas en austenita[41].
- $A_{c3}$  la temperatura a partir de la cual toda la ferrita puede transformarse en austenita durante un calentamiento.

Por debajo de  $A_{c1}$ , un acercamiento a 720 °C [41] puede afectar a la perlita. Esta área puede verse sometida a envejecimiento por deformación. Hougardy, Kasatkin y Trzaska [35] [36] han escrito fórmulas para obtener los valores de  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ . Las fórmulas de los diferentes autores anteriormente se han nombrado:

- *Hougardy*

$$A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = 902 - 255C + 19Si - 11Mn - 5Cr + 13Mo - 20Ni + 55V \quad (7)$$

$$A_{c1}(^{\circ}\text{C}) = 739 - 22C + 2Si - 7Mn + 14Cr + 13Mo - 13Ni \quad (8)$$

- *Kasatkin*

$$\begin{aligned} A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = & 912 - 370C - 27.4Mn + 27.3Si - 6.35Cr - 32.7Ni + 95.2V + 190Ti \\ & + 72Al + 64.5Nb + 5.57W + 332S + 276P + 485N - 900B \\ & + 16.2CMn + 32.3CSi + 15.4CCr + 48C Ni + 4.32SiCr - 17.3SiMo \\ & - 18.6SiNi + 4.8MnNi + 40.5MoV + 174C^2 + 2.46Mn^2 + 6.86Si^2 \\ & + 0.322Cr^2 + 9.9Mo^2 + 1.24Ni^2 - 60.2V^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_{c1}(^{\circ}\text{C}) = & 723 - 7.8Mn + 37.7Si + 18.1Cr + 44.2Mo + 8.95Ni + 50.1 + 21.7Al \\ & + 3.18W + 397S - 830N - 11.5CSi - 14MnSi - 3.10SiCr \\ & - 57.9CMo - 15.5 MnMo - 5.28 cNi - 6MnNi + 6.77SiNi \\ & - 0.8CrNi - 27.4CV + 30.8MoV - 0.84 Cr^2 - 3.46Mo^2 - 0.46Ni^2 \\ & - 28V^2 \end{aligned} \quad (10)$$

- *Trzaska(I) [35]*

$$\begin{aligned} A_{c3}(^{\circ}\text{C}) = & 937.3 - 2245.4\sqrt{C} - 17Mn + 34Si - 14Ni + 21.6Mo + 41.8V \\ & - 20Cu \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A_{c1}(^{\circ}\text{C}) = & 739 - 22.8C - 6.8Mn + 18.2Si + 11.7Cr - 15Ni - 6.4Mo - 5V \\ & - 28Cu \end{aligned} \quad (12)$$

- *Trzaska (II)* [36]

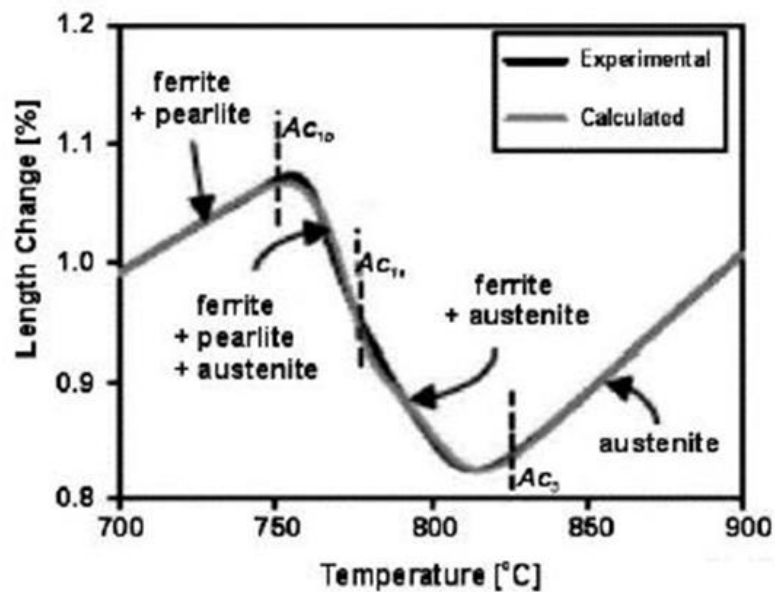
$$A_{c3} (^{\circ}\text{C}) = 925 - 219\sqrt{C} - 7Mn + 39Si - 16Ni + 13Mo + 97V \quad (13)$$

$$A_{c1} (^{\circ}\text{C}) = 742 - 29C - 14Mn + 13Si + 16Cr - 17Ni - 16Mo + 45V + 36Cu \quad (14)$$

Los valores  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$  para los aceros especificados en normas están presentados en la Tabla 9., y en la Ilustración 40 muestra un ejemplo de transformación de fase a calentamiento continuo de 0.05 K/s para el acero AISI 5120. Esta figura permite interpretar los cambios metalográficos y geométricos producidos alrededor de las temperaturas  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$ .

Tabla 9. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros de normas según Hougardy, Kasatkin, Trzaska [35] y Trzaska [36].

Especificación	Espesor (mm)	Hougardy		Kasatkin		Trzaska (I) [35]		Trzaska(II) [36]	
		Temperatura (°C)		Temperatura (°C)		Temperatura (°C)		Temperatura (°C)	
		A <sub>c3</sub>	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>	A <sub>c1</sub>
D420 ~ D690 / E420 ~ E690 Máx.		848.5	724.1	862.4	730.9	909.3	732.3	922.6	723.7
D420 ~ D690 / E420 ~ E690 Mín.		864.2	735.7	886.5	753.9	935.6	744.2	929.4	745.6
S275JR 1.0044	t≤16	832.0	723.9	838.6	712.8	877.2	708.6	891.5	734.7
S275JR 1.0044	16<t≤40	832.0	723.9	838.6	712.8	877.2	708.6	891.5	734.7
S275J0 1.0143	t≤16	839.6	724.5	843.9	711.3	880.6	709.3	894.8	735.6
S275J0 1.0143	16<t≤40	839.6	724.5	843.9	711.3	880.6	709.3	894.8	735.6
S275J2 1.0145	t≤16	839.6	724.5	835.0	719.8	880.6	709.3	894.8	735.6
S275J2 1.0145	16<t≤40	839.6	724.5	835.0	719.8	880.6	709.3	894.8	735.6
S355JR 1.0045	t≤16	833.7	723.6	846.2	719.0	890.9	717.3	909.0	739.6
S355JR 1.0045	16<t≤40	833.7	723.6	846.2	719.0	890.9	717.3	909.0	739.6
S355J0 1.0553	t≤16	843.9	724.5	853.2	717.8	895.4	718.2	913.4	740.8
S355J0 1.0553	16<t≤40	843.9	724.5	853.2	717.8	895.4	718.2	913.4	740.8
S355J2 1.0557	t≤16	843.9	724.5	844.3	726.2	895.4	718.2	913.4	740.8
S355J2 1.0557	16<t≤40	843.9	724.5	844.3	726.2	895.4	718.2	913.4	740.8
S355K2 1.0596	t≤16	843.9	724.5	844.3	726.2	895.4	718.2	913.4	740.8
S355K2 1.0596	16<t≤40	843.9	724.5	844.3	726.2	895.4	718.2	913.4	740.8
AH/DH/EH 36 Máx.	t≤100	845.5	723.5	859.3	737.7	900.2	718.6	917.9	733.1
AH/DH/EH 36 Mín.	t≤100	842.9	727.6	857.2	738.2	896.4	716.4	902.4	735.5



**Ilustración 40.** Transformación de fase del AISI 5120 durante calentamiento continuo[35].

Los artículos [32], [33] y [34] muestran la composición química de otras especificaciones de acero. Estas composiciones están detalladas en la Tabla 10. Para esas calidades de acero, se muestran las temperaturas de equilibrio  $Ae_1$  y  $Ae_3$  desde la Tabla 11. Las temperaturas de transformación  $Ac_1$  y  $Ac_3$  durante el calentamiento de aceros experimentales se muestran en la Tabla 12.



Tabla 10. Composición química según artículos.

Especificación	Tratamiento térmico	Espesor (mm)	Composición química (%)																	
			C	Ni	Si	V	Mo	W	Mn	Cr	Cu	P	Al	As	Ti	S	N	Nb	Ca	B
<b>K5D</b>	Laminado	30	0.12		0.34				1.24			0.025				0.02				
<b>K5A</b>	Normalizado	30	0.15		0.46				1.35			0.014				0.019				
<b>K5E</b>	Normalizado	30	0.13		0.35				1.35			0.027				0.017				
<b>K5D</b>	Laminado	12.7	0.15		0.46				1.31			0.014				0.019				
<b>15CMn</b>	-		0.16	0.01	0.25		0.009		1.5	0.01		0.012	0.032			0.004	0.0084			0.0005
<b>S355M</b>	-		0.09		0.16	0.002			1.06				0.003		0.017			0.029		
<b>S275J0</b>	-		0.06		0.2	0.035			1.04				0.002		0.001			0.002		
<b>S275JR</b>	-		0.07		0.17	0.012			1.1				0.002		0.005			0.002		
<b>S355K2</b>	-		0.09		0.17	0.003			1.04				0.015		0.019			0.011		

**Tabla 11. Temperaturas de transformación para aceros analizados en artículos según Andrews, Eldis y Grange.**

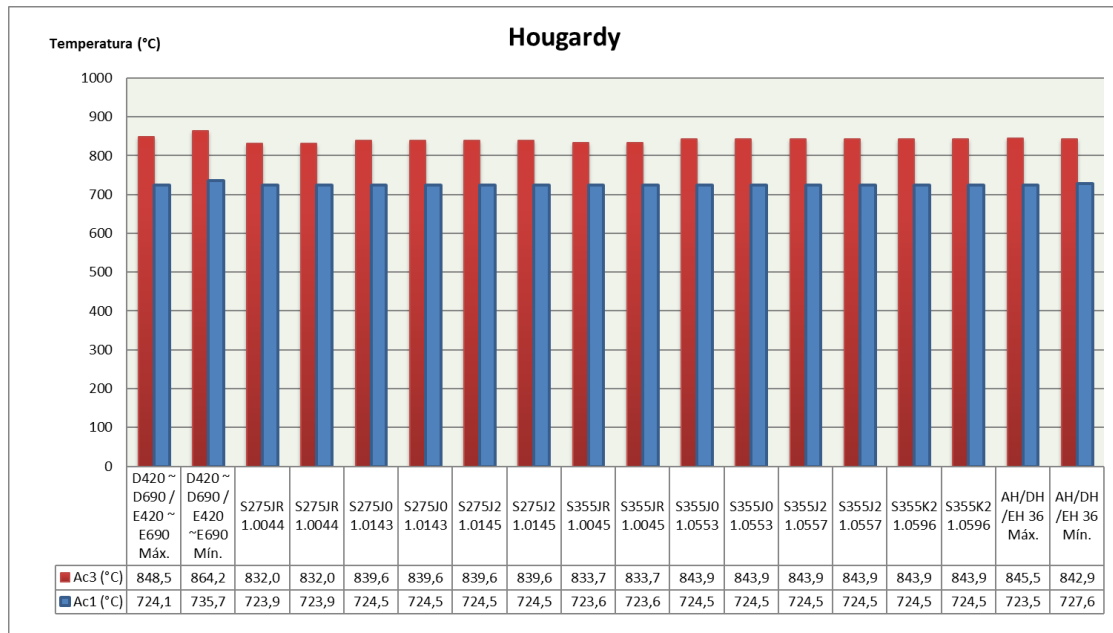
Especificación	Tratamiento térmico	Espesor (mm)	Andrews		Eldis		Grange	
			Temperatura (°C)		Temperatura (°C)		Temperatura (°C)	
			Ae3	Ae1	Ae3	Ae1	Ae3	Ae1
<b>K5D</b>	Laminado	30	893.3	719.6	873.3	696.8	811.9	705.4
<b>K5A</b>	Normalizado	30	884.6	721.9	875.7	697.2	809.0	707.4
<b>K5E</b>	Normalizado	30	890.9	718.7	872.6	695.0	806.7	703.0
<b>K5D</b>	Laminado	12.7	885.8	722.3	875.7	697.9	810.0	708.4
<b>15CMn</b>	-		881.4	714.2	863.4	690.3	784.9	695.4
<b>S355M</b>	-		884.4	716.3	867.8	696.3	811.7	702.7
<b>S275J0</b>	-		886.5	717.7	873.7	697.5	825.1	704.8
<b>S275JR</b>	-		881.5	716.2	870.9	695.8	817.9	702.1
<b>S355K2</b>	-		891.2	716.8	868.3	696.9	813.0	703.6



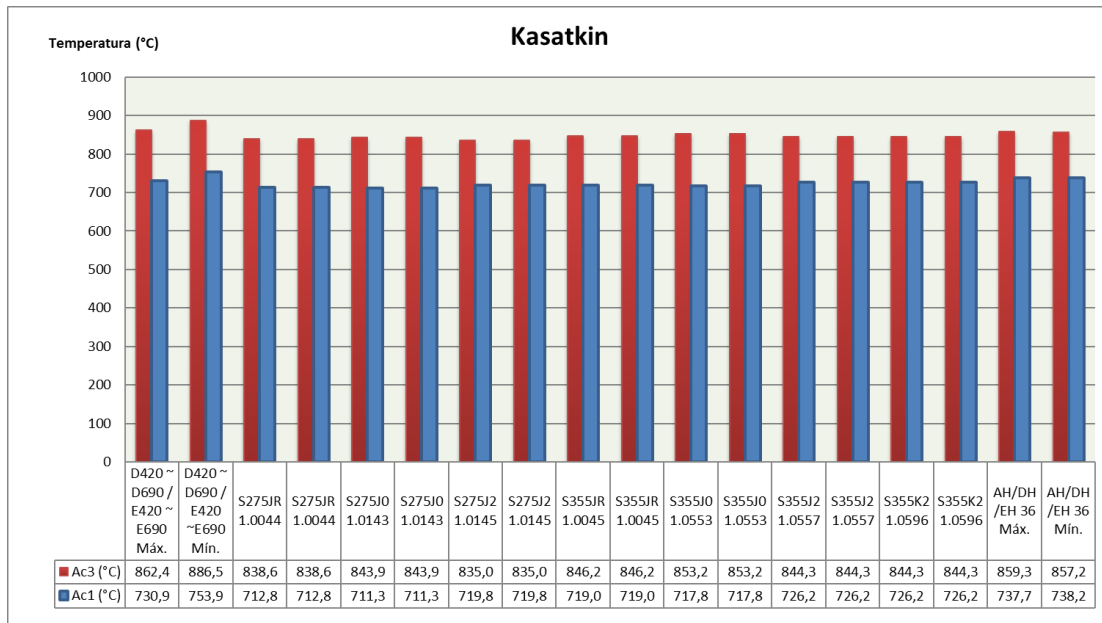
Tabla 12. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Hougardy, Kasatkin, Trzaska [35] y Trzaska [36].

Especificación	Tratamiento térmico	Espesor (mm)	Hougardy		Kasatkin		Trzaska(I) [35]		Trzaska(II) [36]	
			Temperatura (°C)		Temperatura (°C)		Temperatura (°C)		Temperatura (°C)	
			Ac3	Ac1	Ac3	Ac1	Ac3	Ac1	Ac3	Ac1
K5D	Laminado	30	864.2	728.4	865.7	726.6	914.3	734.0	916.4	725.6
K5A	Normalizado	30	857.6	727.2	854.7	726.9	913.2	734.8	917.1	724.7
K5E	Normalizado	30	860.7	727.4	860.5	724.5	911.7	733.2	915.0	723.9
K5D	Laminado	12.7	858.1	727.5	855.4	727.5	913.8	735.0	917.3	725.3
15CMn	-		849.3	725.6	843.5	711.3	902.4	729.6	906.7	719.5
S355M	-		870.5	729.9	865.5	719.1	914.7	732.6	914.2	726.7
S275J0	-		881.0	730.8	874.8	721.8	921.1	734.0	922.3	729.9
S275JR	-		875.9	730.1	868.2	719.5	917.0	733.0	917.4	727.3
S355K2	-		871.0	730.1	866.4	719.9	915.4	733.0	914.8	727.2

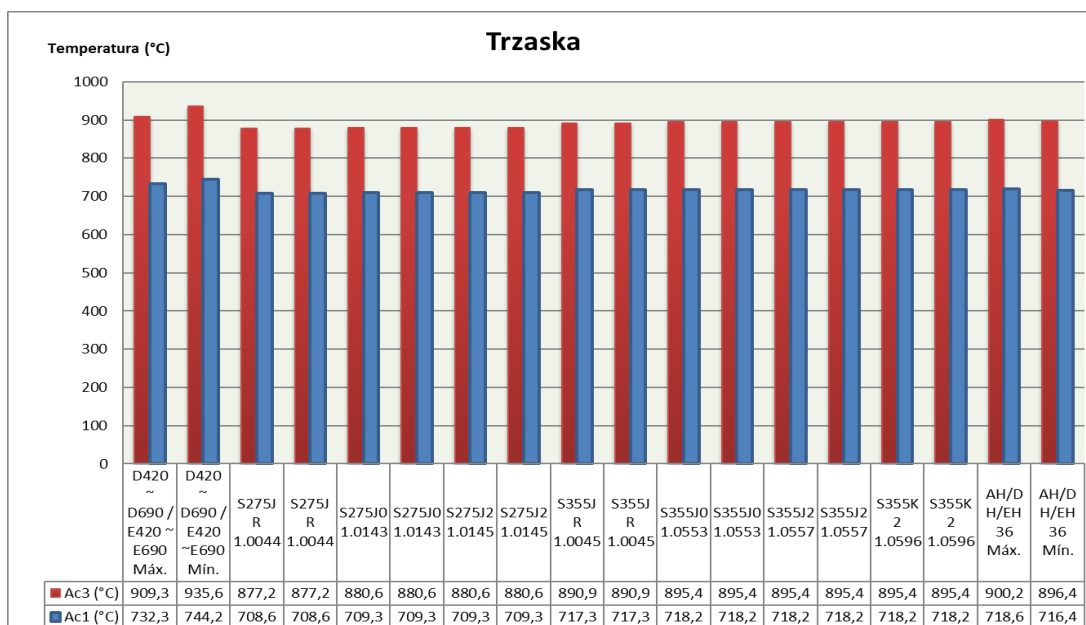
Desde la Ilustración 41 hasta la Ilustración 44 se muestra una comparación entre las temperaturas de transformación durante el calentamiento Ac1 y Ac3 de aceros experimentales según algunos artículos.



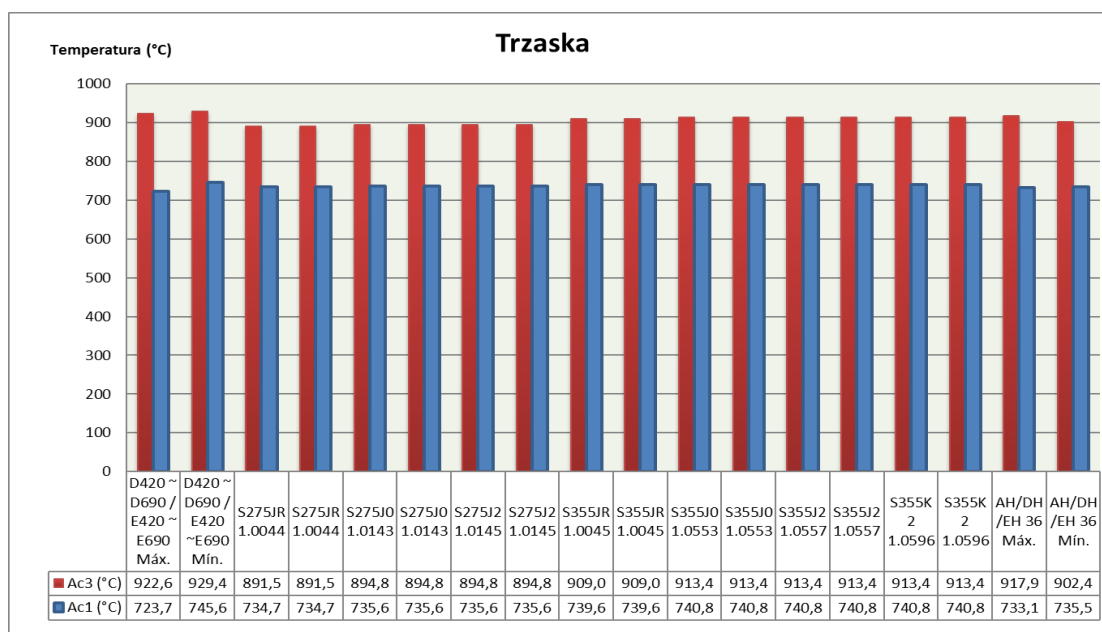
**Ilustración 41. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Hougardy.**



**Ilustración 42. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Kasatkin.**



**Ilustración 43. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Trzaska (I)[35]**



**Ilustración 44. Temperaturas de transformación durante calentamiento para aceros analizados en artículos según Trzaska (II)[36].**

El proyecto OPTISTRAIGHT [34] ha determinado que los aceros normalizados no deberían alcanzar una temperatura superficial de 900 °C ni una temperatura de 700 °C en la sección completa. Esta medida de prevención pretende la conservación de propiedades mecánicas.

# ***CAPITULO 3.***

# ***MATERIALES Y***

# ***METODOLOGIA***

## ***CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOLOGIA***

### ***3.1. INTRODUCCIÓN.***

A lo largo del capítulo se van a describir con detalle la naturaleza y propiedades de los materiales utilizados en el proyecto; además, se detalla la actuación del ensayo real llevada a cabo sobre uno de ellos, de acuerdo con el resumen de actividades y objetivos descritos en el **Capítulo 1**.

Desde el punto de vista experimental, el objetivo principal de este trabajo consiste en caracterizar el comportamiento de 2 aceros estructurales objetos del estudio tras haber sido sometidos al método de curvado mediante líneas de calor. Para ello se ha diseñado un programa de actuaciones que incluye una comparativa de cada clase de acero entre su estado original y después de haber sometido al método de curvado mediante líneas de calor. En este caso solo se ha ensayado un acero, el otro acero se explicará a lo largo del **Capítulo 4**.

Otro objetivo principal de este trabajo es el desarrollo y validación de una herramienta analítica y numérica que nos permita predecir las consecuencias de la aplicación del método de curvado mediante líneas de calor sobre la geometría del componente y sobre su estado de tensiones residuales, en otro aceros.

Para estos dos objetivos principales se han dispuesto de un grupo de aceros que se explicara a lo largo del siguiente punto.

### ***3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ACEROS.***

El método de curvado mediante líneas de calor se aplica fundamentalmente en aceros de construcción; por ese motivo, se han seleccionado para este trabajo una serie de cuatro aceros estructurales de amplia difusión. Como es bien sabido, el acero es una aleación de hierro (Fe) y carbono (C), en la cual la cantidad máxima de carbono es inferior al 2.1% en peso. El acero también contiene, típicamente, otros elementos químicos como fósforo (P), azufre (S) y nitrógeno (N). Los aceros aleados contienen, además, habitualmente, manganeso (Mn), silicio (Si), cromo (Cr), níquel (Ni) y molibdeno (Mo), etc., los cuales les confieren características específicas en cuanto a resistencia, soldabilidad, resiliencia o comportamientos frente a la corrosión, entre otras. El acero es, en general, un material dúctil, maleable, forjable y soldable.

El contenido de carbono tiene un efecto fundamental en las propiedades del acero. Como regla general, a medida que crece el contenido de carbono, aumenta la dureza y la resistencia del acero, pero también aumenta su fragilidad y disminuye la ductilidad. Además, la presencia de carbono reduce su soldabilidad.

Una primera clasificación sobre los tipos de acero existentes se basa en su contenido de carbono y otros elementos aleantes; por ese motivo se pueden distinguir en las siguientes familias:

- **Aceros no aleados:** el contenido de carbono es inferior al 0.2%.
- **Acero de baja aleación:** contiene carbono en cantidad superior al 0.2% y una cantidad total de otros elementos no superior al 5%.
- **Acero de alta aleación:** contiene una cantidad total de otros elementos superior al 5%.  
Dentro de este amplio grupo se encuentran los aceros inoxidables, que contienen un mínimo del 10.5% de cromo y un máximo del 1.2% de carbono.

### **3.2.1.      *Designación de los aceros.***

Antes de entrar a detallar las características de cada uno de los materiales seleccionados conviene realizar un pequeño repaso que aclare la nomenclatura que se emplea actualmente en el ámbito de los aceros.

La Norma [42] establece las reglas para la designación simbólica de los aceros mediante símbolos numéricos y letras que expresan ciertas características básicas, por ejemplo, mecánicas, químicas, físicas o relativas al tipo de aplicación para la que están indicados.

La designación abreviada de los aceros se compone de una letra que designa la aplicación para la que está destinada el acero seguido de un número, identificativo del límite elástico del material. Adicionalmente se pueden entrar, seguidas del número, más letras que designen propiedades particulares de cada acero. [43].

En la Tabla 13 se detallan los distintos grupos de aceros existentes recogidos en las normas [42] y [43]; cada grupo está representado por una primera letra que determina su uso como se ha explicado anteriormente.



Tabla 13. Tipos de aceros recogidos por las normas [42] y [43]

<b>“G”</b>	<b>Fundiciones de acero</b>
<b>“S”</b>	Aceros Estructurales
<b>“P”</b>	Aceros para vasijas a presión
<b>“L”</b>	Acero para Tuberías
<b>“E”</b>	Aceros Ingenieriles
<b>“B”</b>	Aceros para hormigones reforzados
<b>“Y”</b>	Aceros para hormigones pretensados
<b>“R”</b>	Aceros para o con la forma de raíles
<b>“H”</b>	Aceros para laminado en frio de alto límite elástico para conformado en frio
<b>“M”</b>	Aceros eléctricos

De los aceros nombrados se han utilizado en este trabajo los aceros estructurales que, como se puede observar en la Tabla 13, se designan con una “S” seguida de un número que nos indica el valor mínimo especificado del límite elástico en MPa, para el menor espesor disponible; posteriormente se añaden letras en función de que posean características especiales. En la Ilustración 45 nos sirve a modo de resumen un esquema explicativo relativo a la designación de una acero estructural cualquiera; además se incluyen las diferentes siglas que se pueden encontrar en la norma [43].

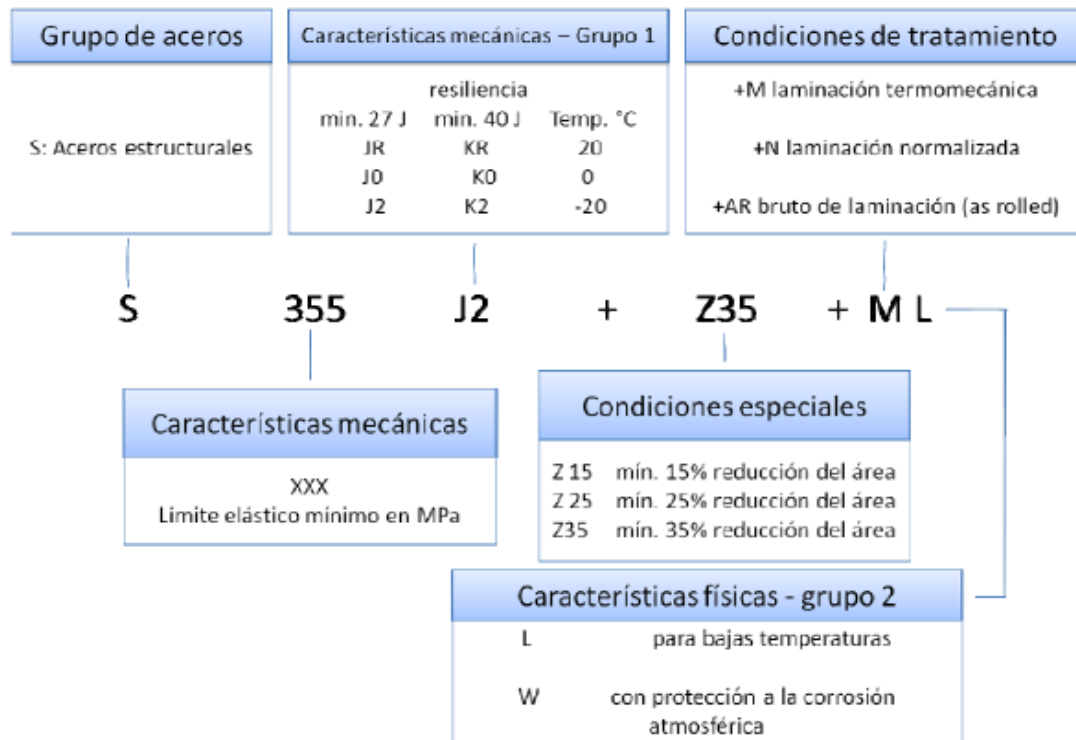


Ilustración 45. Nomenclatura según [43] para aceros.

En la Tabla 14 se incluyen todos los símbolos adicionales recogidos en [43], para los aceros estructurales clasificados en dos grupos; estos símbolos adicionales delimitan aceros según sus propiedades físicas y de fabricación particulares.

El grupo 1 hace referencia a las características mecánicas de resiliencia mediante una serie de denominaciones que van desde JR a J6 dependiendo de la temperatura mínima a la que deben ser capaces de absorber las energías de referencia en el ensayo de impacto Charpy.

En el grupo 2 se encuentran definidas las características de fabricación que puedan tener los distintos aceros, así como propiedades físicas adicionales.

Los aceros convencionalmente empleados en construcción se corresponden con los siguiente grados:

- Grado JR: aplicados en construcción ordinaria.
- Grado J0: aplicación en construcción con alta exigencias de soldabilidad.
- Grado J2: aplicación en construcción con especiales exigencias de resistencia, resiliencia y soldabilidad.

Tabla 14. Símbolos adicionales utilizados en los aceros estructurales.

Símbolos adicionales para los aceros estructurales				
<i>Grupo 1</i>				<i>Grupo 2</i>
27J	40J	60J	°C	C= Conformado especial en frío D= Galvanización en caliente E= Esmaltado F= Forjado H= Perfil hueco L= Baja temperatura M= Laminación termo mecánica N= Normalizado o laminado de normalización P= Tablestacas Q= Templado y revenido S= Construcción naval T= Tubos W= Resistentes a la corrosión atmosférica A= Endurecimiento por precipitación M= Laminación termo mecánica N= Normalizado o laminado de normalización Q= Templado y revenido G= Otras características
JR	KR	LR	20	
J0	K0	LR	0	
J2	K2	L2	-20	
J3	K3	L3	-30	
J4	K4	L4	-40	
J5	K5	L5	-50	
J6	K6	L6	-60	
				Nota: los símbolos A, M, N y Q se aplican a los aceros de grano fino

### 3.2.2. *Aceros estructurales.*

En el diseño de una estructura realizada en acero se debe tener en consideración un amplio número de variables, entre las que se encuentran las solicitaciones que va a soportar o las condiciones ambientales en las que va a trabajar (como la temperatura o la agresividad del ambiente). Con el fin de satisfacer las principales necesidades de los constructores, la industria ha desarrollado un amplio abanico de posibilidades. Para el presente trabajo se han seleccionado un conjunto de aceros estructurales de distintos usos y calidades de aceros que se manejan en construcciones navales.

Los aceros estructurales para construcción quedan regulados por las distintas Euronormas EN y, de acuerdo con ellas, se clasifican en atención al proceso de fabricación de estos del siguiente modo:

- Productos de acero laminado en caliente, definidos en la [45].
- Productos huecos para la construcción, acabados en caliente; normas [46] y [47].
- Perfiles abiertos para la construcción laminados en frío y perfilados; norma [48].

- Productos planos de acero recubiertos en continuo de materias orgánicas (prelacados); normas [49] y [50].

Debido a la gran cantidad de aceros estructurales que se engloban en estos cuatro grupos, es un trabajo impensable realizar una investigación exhaustiva sobre el curvado de chapas mediante líneas de calor, si tenemos en consideración que cada uno de los grupos incluye, a su vez materiales muy diferentes en cuanto a su composición química, propiedades físicas, etc. Tras una búsqueda de diferentes estudios he podido comprobar que el material más utilizado son los aceros laminados en caliente, debido a que tiene más aplicaciones futuras.

El proceso de fabricación de estos acero condiciona su naturaleza microestructural. Como su nombre indica, estos aceros son sometidos a una fase de laminado en caliente. Para ello es preciso elevar la temperatura del material, antes del comienzo hasta 1200°C-1300°C, son valores próximos a los de fusión (aproximadamente alrededor de 1375°C, bien es cierto que el punto de fusión del acero depende del tipo de aleación y de la presencia de elementos aleantes). Una vez alcanzada la temperatura necesaria, se hace pasar al acero por una serie de rodillos que, de laminación, de manera paulatina, conforman el material hasta alcanzar la forma adecuada.

Dentro del grupo de aceros laminados en caliente la norma [48], considera diferentes subgrupos con características específicas; en este trabajo, se han seleccionado materiales del siguiente subgrupo:

- Aceros estructurales no aleados.
- Aceros soldables y de grano fino con laminación termomecánica.

Las características fundamentales de estos subgrupos y la descripción de los aceros seleccionados en el presente trabajo se explican en los siguientes apartados:

### **3.2.2.1.      *Aceros estructurales no aleados.***

De acuerdo con la norma [51], los productos laminados en caliente no aleados son empleados para construcciones metálicas en general. Se trata de los aceros de uso más extendido en edificación y obras públicas en general. En la norma se diferencian cuatro aceros designados como S235, S275, S355 y S450. Se consideran los siguientes grados: JR, J0, J2 (subgrados J2G3 y J2G4) y K2 (subgrados K2G3 y K2G4). Todos estos materiales son soldables, siendo la aptitud al soldeo creciente desde el grado JR al K2.

En la tabla (“Clases de aceros laminados en caliente no aleados”) se encuentran los diferentes aceros no aleados laminados en caliente que actualmente se contemplan en la norma [51], y se ofrecen los valores máximos de C, Mn, P, S, N, Cu y otros compuestos aleantes.

A su vez, cada acero debe poseer unas propiedades mecánicas mínimas que el fabricante debe garantizar a la hora de suministrar un determinado grado. Las características mecánicas mínimas para los distintos grados de aceros no aleados laminados en caliente de acuerdo con la norma [45], se muestran en la **Tabla 15**, (límite elástico y resistencia a tracción) y en la tabla 3.5 (alargamiento en rotura).

Tabla 15. Clases de aceros laminados en caliente no aleados [42].

Designación	% C máx para un espesor nominal del producto en mm			Mn % max	Si % max	P % max	S % max	N % max	Cu % max	Otros % max
	≤16	>16; ≤40	>40							
S 235 JR	0,17	0,17	0,20	1,40	-	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S 235 JO	0,17	0,17	0,17	1,40	-	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S 235 J2	0,17	0,17	0,17	1,40	-	0,025	0,025	-	0,55	-
S 275 JR	0,21	0,21	0,22	1,50	-	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S 275 JO	0,18	0,18	0,18	1,50	-	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S 275 J2	0,18	0,18	0,18	1,50	-	0,025	0,025	-	0,55	-
S 355 JR	0,24	0,24	0,24	1,60	0,55	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S 355 JO	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S 355 J2	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-	0,55	-
S 355 K2	0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-	0,55	-
S 450 JO	0,20	0,20	0,22	1,70	0,55	0,030	0,030	0,025	0,55	1)

1) El acero puede contener como máximo un 0,05% de Nb, 0,13% max. de V y 0,05% max. de Ti

Tabla 16. Características mecánicas de los aceros no aleados laminados en caliente a temperatura ambiente según [42]

Designación según		Límite elástico, mínimo, $R_{eH}^a$ , en MPa <sup>b</sup>										Resistencia a tracción $R_m^a$ , en MPa <sup>b</sup>				
		Espesor nominal, en milímetros										Espesor nominal en milímetros				
UNE EN 10027-1 y CR 10260	UNE EN 10027-2	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400 <sup>c</sup>		≤ 3	> 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 ≤ 400 <sup>c</sup>
S 235 JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360 a 510	360 a 510	360 a 510	350 a 500	340 a 490	-
S 235 JO	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360 a 510	360 a 510	360 a 510	350 a 500	340 a 490	-
S 235 J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185	175	165	360 a 510	360 a 510	360 a 510	350 a 500	340 a 490	330 a 480
S 275 JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430 a 580	410 a 560	410 a 560	400 a 540	380 a 540	-
S 275 JO	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430 a 580	410 a 560	410 a 560	400 a 540	380 a 540	-
S 275 J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195	430 a 580	410 a 560	410 a 560	400 a 540	380 a 540	380 a 540
S 355 JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510 a 680	470 a 630	470 a 630	450 a 600	450 a 600	-
S 355 JO	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510 a 680	470 a 630	470 a 630	450 a 600	450 a 600	-
S 355 J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510 a 680	470 a 630	470 a 630	450 a 600	450 a 600	450 a 600
S 355 K2	1.0596	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510 a 680	470 a 630	470 a 630	450 a 600	450 a 600	450 a 600
S 450 JO <sup>d</sup>	1.0590	450	430	410	390	380	380	-	-	-	-	550 a 720	530 a 700	-	-	-

a Para chapas, bandas y planos de anchura > 600 mm, los valores se aplican a la dirección transversal “t”. Para los demás productos los valores se aplican a la dirección paralela “l” a la de laminación.

b 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>

c Los valores son aplicables a los productos planos.

d Aplicable a productos largos solamente

Dos de los grados de esta familia de aceros han sido seleccionados para su estudio, concretamente, el S235 JR y el S355 J2. Adicionalmente se ha empleado en algún caso más adelante detallado el acero S235J0, que representa una variante del acero S235JR para su uso a temperaturas más bajas.

**Tabla 17. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente según [42]**

Designación según		Posición de las probetas en el ensayo <sup>a</sup>	Porcentaje mínimo de alargamiento tras la factura % <sup>a</sup>										
			L <sub>0</sub> = 80 mm Espesor nominal en mm					L <sub>0</sub> = 5,65√S <sub>0</sub> Espesor nominal en mm					
			≤ 1,0	> 1,0 ≤ 1,5	> 1,5 ≤ 2,0	> 2,0 ≤ 2,5	> 2,5 ≤ 3,0	> 3,0 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 <sup>c</sup> ≤ 400 sólo para los grados J2 y K2
UNE EN 10027-1 y CR 10260	UNE EN 10027-2												
S 235 JR S 235 J0 S 235 J2	1.0038 1.0114 1.0117	l t	17 15	18 16	19 17	20 18	21 19	26 24	25 23	24 22	22 21	21 21	- - 21 (l y t)
S 275 JR S 275 J0 S 275 J2	1.0044 1.0143 1.0145	l t	15 13	16 14	17 15	18 16	19 17	23 21	22 20	21 19	19 19	18 18	- - 18 (l y t)
S 355 JR S 355 J0 S 355 J2 S 355 K2	1.0045 1.0553 1.0577 1.0596	l t	14 12	15 13	16 14	17 15	18 16	22 20	21 19	20 18	18 18	17 17	- - 17 (l y t) 17 (l y t)
S 450 J0 <sup>d</sup>	1.0590	l	-	-	-	-	-	17	17	17	17	-	-

a Para chapas, bandas y planos de anchura > 600 mm, los valores se aplican a la dirección transversal "t". Para los demás productos los valores se aplican a la dirección paralela "l" a la laminación.

b Los valores son aplicables a los productos planos.

c Aplicable a productos largos solamente

### 3.2.2.2. Aceros soldables y de grano fino con laminación termomecánica.

Este tipo de aceros pertenecen a la familia de aceros aleados descritos en el Apartado 3.2. En este tipo de aceros no tiene gran importancia las propiedades de resistencia a tracción y tenacidad, sino también su buena soldabilidad debido a un bajo nivel de carbono equivalente.

El proceso de laminado termomecánica se desarrolló en los años 70 para su aplicación en el campo de la industria naval y la construcción de plataformas de extracción "offshore". Mientras que la laminación convencional se obtiene la geometría deseada seguido de un tratamiento de normalizado (Ilustración 46). Mediante la laminación termo mecánica se procura obtener una buena combinación de propiedades mecánicas en los productos directamente tras el conformado en caliente, sin necesidad de aplicar tratamientos térmicos posteriores. Su uso está estrechamente ligado a la utilización de elementos microaleantes, como niobio, titanio y vanadio, utilizados para facilitar el proceso de acondicionamiento de la austenita, bajar las temperaturas de transformación y proveer endurecimiento por precipitación de la ferrita.

La aplicación de tratamientos termo mecánicos tiene como objeto la obtención de estructuras de ferrita uniformes, de tamaño de grano fino, directamente tras el proceso de laminación; esto conlleva la obtención de límites elásticos elevados y altas tenacidades. Los tratamientos pueden ser supercríticos (por encima de la temperatura A3, límite de la región austenítica para aceros de bajo contenido de carbono), con o sin recrystalización, o inter críticos, entre A3 y A1, temperatura eutectoide que marca el mínimo al que se puede encontrar austenita.

Con la aplicación de los tratamientos termo mecánicos se pretende obtener tres objetivos principales:

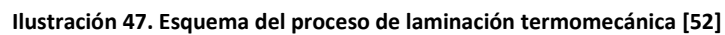
- Acondicionar la austenita, evitando el crecimiento de grano durante el precalentamiento y tras la recrystalización entre pasadas, o impidiendo la recrystalización tras la deformación.
- Controlar la transformación austenita/ferrita, incrementando en la medida de lo posible los lugares de nucleación para la ferrita.
- Endurecer el acero por medio de la precipitación en ferrita de carbónitruros finos.

Típicamente los desbastes de los aceros se calientan a 1200°C-1500°C y el proceso de laminación en caliente finaliza normalmente por encima de los 1000°C. A la temperatura de recalentamiento, el grano de austenita crece significativamente y aunque durante cada pasada de laminación el grano se regenera como consecuencia del proceso de recrystalización, entre las sucesivas pasadas el grano de austenita vuelve a crecer, de tal manera que al final del proceso se obtiene un grano de austenita relativamente grueso, que en el enfriamiento posterior da lugar a un grano de ferrita también relativamente grosero. El normalizado posterior, tal y como se muestra en la Ilustración 46, contribuiría a afinar algo el grano.

La deformación en la región bifásica austenita-ferrita conduce a un aumento de la resistencia de la ferrita.

Finalmente, el enfriamiento acelerado durante la transformación aplicado en los tres casos mencionados conduce a un mayor afino de la ferrita, y en el caso de deformación en la región bifásica, a la obtención de estructuras duales de ferrita y martensita por temple. En la Ilustración 47 se presenta, en función del tiempo y de la temperatura esquema de los diferentes tipos de laminación controlada y las estructuras resultantes.





Los aceros de laminado termomecánico presentan mejor tenacidad a bajas temperaturas que los aceros laminados convencionales, gracias también a un menor contenido en carbono equivalente. Su uso en construcción es prácticamente nulo pero su utilización en calderería está muy extendida.



Los grados, calidades y composición química de estos aceros y sus propiedades mecánicas se recogen en las siguientes tablas (composición química en la Tabla 18 y propiedades mecánica en la Tabla 19) extraídas de la Norma [42].

**Tabla 18. Composición química de los distintos aceros laminados termomecánicamente [42].**

Designación según		C % máx	Si % máx	Mn %	P % máx a	S % máx a, b	Nb % máx	V % máx	Al <sub>total</sub> % mín c	Ti % máx	Cr % máx	Ni % máx	Mo % máx	Cu % máx d	N % máx
UNE EN 10027-1 y CR 10260	UNE EN 10027-2														
S275M	1.8818	0,13 e	0,50	1,50	0,030	0,025	0,05	0,08	0,02	0,05	0,30	0,30	0,10	0,55	0,015
S275ML	1.8819				0,025	0,020									
S355M	1.8923	0,14 e	0,50	1,60	0,030	0,025	0,05	0,10	0,02	0,05	0,30	0,50	0,10	0,55	0,015
S355ML	1.8834				0,025	0,020									
S420M	1.8825	0,16 f	0,50	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,02	0,05	0,30	0,80	0,20	0,55	0,025
S420ML	1.8836				0,025	0,020									
S460M	1.8827	0,16 f	0,60	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,02	0,05	0,30	0,80	0,20	0,55	0,025
S460ML	1.8838				0,025	0,020									

- a Para productos largos, el contenido en P y S puede ser un 0,005% superior  
b Para aplicaciones ferroviarias, se puede acordar un contenido máximo de azufre de 0,010% en el pedido.  
Ver opción 32  
c Si existen suficientes elementos fijadores de nitrógeno, no se aplica la limitación del Al total.  
d Contenidos de Cu por encima de 0,40% pueden producir fragilidad durante el conformado en caliente.  
e Para los productos largos, se adoptará un contenido máximo de C de 0,15% en los aceros S 275 y del 0,16% en los aceros S 355.  
f Para los productos largos de los aceros S420 y S460 se adoptará un contenido máximo de C del 0,18%

**Tabla 19. Propiedades mecánicas de los aceros laminados termomecánicamente [42].**

Designación según		Límite elástico de cedencia $R_{eH}$ <sup>a</sup> en MPa <sup>b</sup>						Resistencia a la tracción $R_{mT}$ <sup>a</sup> en MPa <sup>b</sup>					Porcentaje mínimo de alargamiento de rotura <sup>c</sup> % $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$
UNE EN 10027-1 y CR 10260	UNE EN 10027-2	Para un espesor nominal de producto en mm						Para un espesor nominal de producto en mm					
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 120 d	≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 120 d	
S275M S275ML	1.8818 1.8819	275	265	255	245	245	240	370 - 530	360 - 520	350 - 510	350 - 510	350 - 510	24
S355M S355ML	1.8823 1.8834	355	345	335	325	325	320	470 - 630	450 - 610	440 - 600	440 - 600	430 - 590	22
S420M S420ML	1.8825 1.8836	420	400	390	380	370	365	520 - 680	500 - 660	480 - 640	470 - 630	460 - 620	19
S460M S460ML	1.8827 1.8838	460	440	430	410	400	385	540 - 720	530 - 710	510 - 690	500 - 680	490 - 660	17

- a Para chapas, bandas y planos de anchura  $\geq 600$  mm, se utilizarán probetas transversales "t". Para cualquier otro producto los valores dados en la tabla se aplican a probetas longitudinales "l", del ensayo de tracción.  
b 1 Mpa = 1 N/mm<sup>2</sup>  
c Para espesores de producto < 3 mm, para los que se utilizarán probetas de longitud entre puntos  $L_0 = 80$  mm, los valores del alargamiento deberán ser objeto de acuerdo al hacer el pedido.  
d Para productos largos, es aplicable hasta espesores de 150 mm inclusive.

### **3.3. METODOLOGIA DE TRABAJO.**

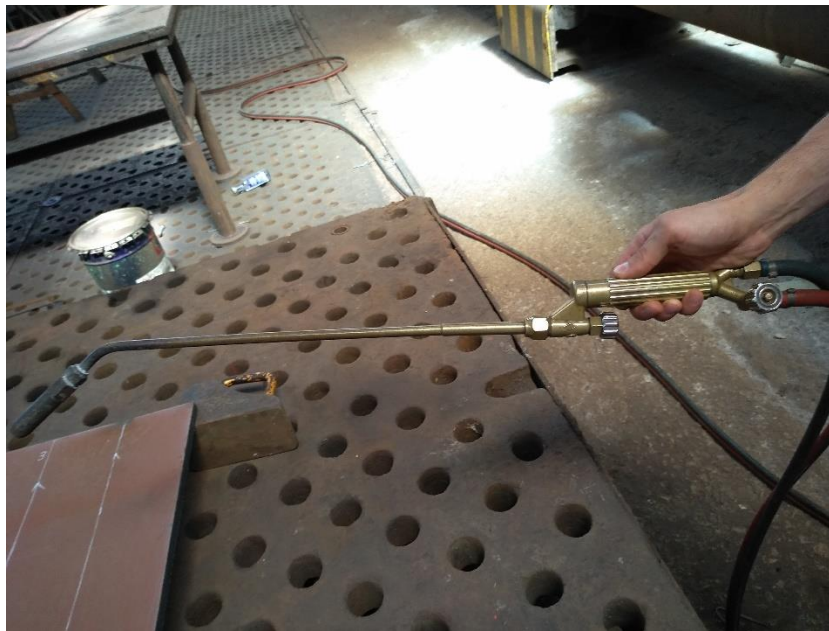
#### **3.3.1. Introducción.**

A lo largo de este punto se va a detallar el procedimiento y explicación del ensayo real llevado a cabo de dos chapas de acero de dimensiones 1000x500x15mm de acero S275, mediante líneas de calor.

#### **3.3.2. Explicación de los ensayos.**

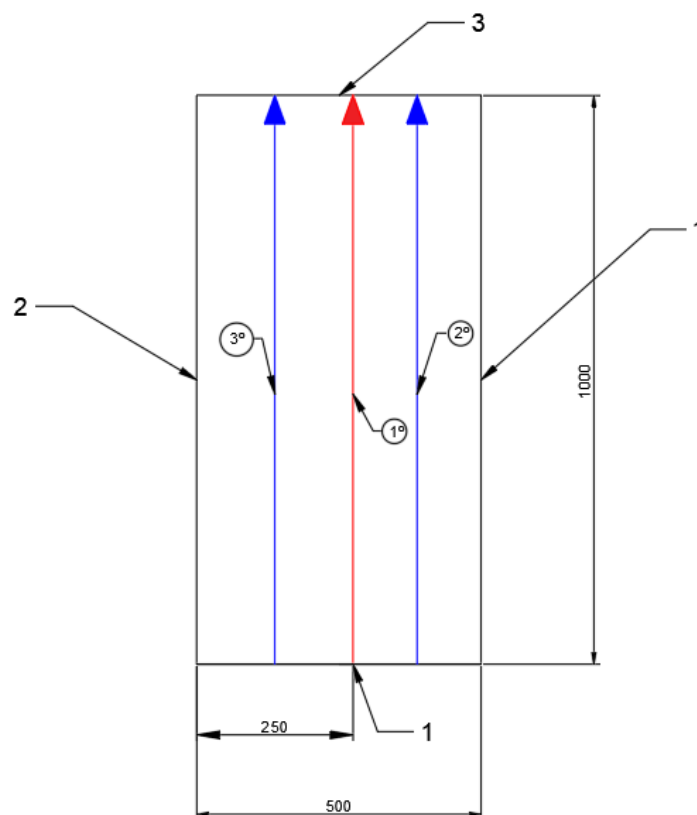
Respecto a la preparación para el ensayo cabe anotar que para el desarrollo del experimento se han ejecutado varias tareas previas a las pruebas de laboratorio en ambas secciones, con el propósito de medir los diferentes componentes de deformación y las variables fundamentales del proceso. Así pues, se realizaron las siguientes actividades previas al desarrollo del ensayo:

1. El corte de 2 chapas, con las siguientes especificaciones: 1000 mm de largo por 500 mm de ancho y 15 mm de espesor.
2. En las 2 chapas cortadas se realizarán dos ensayos, y para tener controlado los lados para su posterior medición se numerados los diferentes lados de las chapas.
3. En el primer ensayo, se realizó un trazado de una línea a la mitad de la plancha en dirección longitudinal (dirección de la aplicación de calor y el orden), y para posterior realización de un ensayo en la misma chapa se trazaron dos líneas más a cada lado de la línea previamente trazada a una distancia de 125 mm. Se puede apreciar el trazo de las líneas en la **Ilustración 49**
4. En el segundo ensayo, se realizó tres trazados de líneas en dirección longitudinal (dirección de la aplicación de calor y el orden). La distancia entre cada líneas es de 125mm. Se puede apreciar el trazo de las líneas en **Ilustración 50**.
5. Datos de las mangueras utilizadas:
  - a. Manguera de Propano: ISO3891-2MPa-P 1500006-17. Diámetro exterior: 15 mm; Diámetro interior: 8 mm.
  - b. Manguera de Oxígeno: ISO 3821-2MPa-8 1500006-17. Diámetro exterior: 15 mm. Diámetro interior: 8 mm.
6. En la **Ilustración 48** , se puede ver la antorcha utilizada. Indicar las vueltas de la rueda que tuvo que realizar el operario para conseguir la llama deseada.
  - a. Rueda delantera para oxígeno: 1 vuelta y cuarto
  - b. Rueda trasera del propano: Casi un cuarto de vuelta.

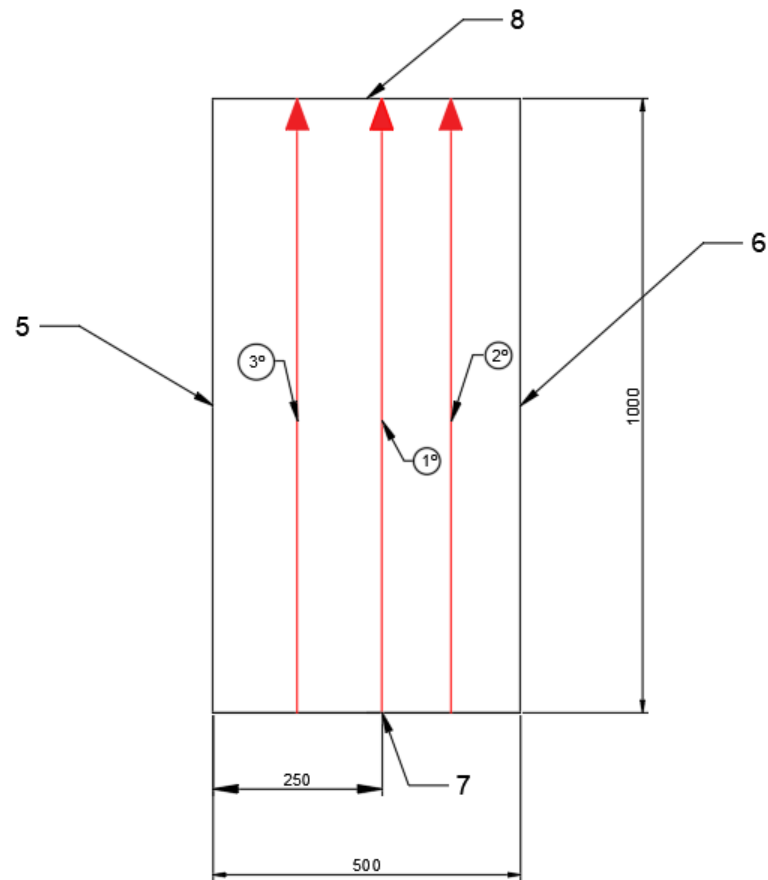


**Ilustración 48. Antorcha.**

A continuación, se presentan las imágenes que ilustran el trazado de las láminas por ambos lados como la plantilla para el registro de las mediciones.



**Ilustración 49.1º Ensayo. Dirección y orden de líneas de calor. Numeración de cantos.**  
Rojo: 1º Línea de calor. Azul: Las 2 Líneas de calor restantes.

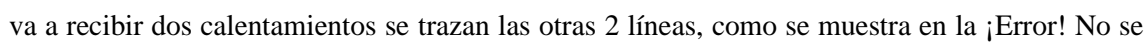


**Ilustración 50. 2º Ensayo. Dirección y orden de líneas de calor. Numeración de cantos.**

**Tabla 20. Plantilla de medición.**

REF (Número de Lado)			
	X	MEDIDA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO			
ZONA 1			
ZONA 2			
ZONA 3			
ZONA 4			
ZONA 5			
ZONA 6			
FIN			

Un dato importante es que se hace necesario, que, para la aplicación del calor, el personal técnico tenga la habilidad y la destreza, y que domine la técnica de aplicar calor por debajo de la fibra neutra, para así poder alcanzar los resultados esperados. Esto debido a que si la velocidad de avance es muy lenta no se produce la deformación por pandeo en la lámina, solo se contrae; y de otro modo, si la velocidad es muy rápida, la penetración de calor es menor, por lo que la contracción se reduce exponencialmente y el metal no logra calentarse como corresponde. Podemos decir entonces, que la velocidad recomendada está entre 5 y 15 mm/s.

Para el procedimiento de ampliación de las líneas de calor en chapas se llevó acabo de la siguiente manera: inicialmente se tomó una chapa plana de dimensiones de 1000 mm x 500 mm x 15 mm, en la cual se trazó 1 línea para una primera pasada, pero se aprovecha que esta chapa va a recibir dos calentamientos se trazan las otras 2 líneas, como se muestra en la . Teniendo la probeta debidamente traza y antes de aplicar la primera línea de calor se definen los parámetros de trabajo del propano y del oxígeno. Tanto para las presiones de oxígeno como de propano no tuve acceso a ese valor, pero me comentaron que era la misma, como he comentado anteriormente se las vueltas que se realizaron en el soplete para ajustar la llama, y los códigos de las mangueras.

A continuación, se indica en una tabla el tiempo aplicado para la realización de la primera línea de calentamiento, para la toma de tiempos no se tienen en cuenta las paradas.

**Tabla 21. Tiempos de 1 Línea de Calor**

RELOJ		
1 LINEA DE CALOR		
HORA COMIENZO	13:00:00	
HORA FINALIZACION	13:05:00	
TOTAL	0:05:00	
VIDEO		
COMIENZO	0:00:13	
PARADA 1	0:03:08	0:03:12
FIN	0:05:08	
TOTAL	0:04:51	

Como podemos observar en la tabla, para la realización de una línea de calor tardamos 4 min y 51 segundos. Por lo tanto, podríamos calcular la velocidad de calentamiento.

$$Velocidad\ 1\ linea\ de\ calor = \frac{1000\ mm}{(4\ min \times (60\ s/1\ min)) + 51\ s} = 3,41\ mm/s$$

Después de la realización del primer ensayo, procedemos a la realización del segundo ensayo, aunque más tarde volveremos sobre el primer ensayo. Tomamos otra chapa con las dimensiones anteriores, pero en este caso trazaremos 3 líneas de calor en sentido longitudinal, como se puede observar en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..* Tras tener la chapa debidamente trazada y antes de aplicar la primera línea de calor se definen los parámetros de trabajo de propano y de oxígeno que es lo mismo que en el primer ensayo.

En la siguiente tabla se indican los tiempos cogidos tanto por la hora como por el tiempo del video teniendo en cuenta las paradas o cortes que puedan surgir. Se pueden ver los tiempos de las tres líneas realizada como se ha comentado anteriormente.

**Tabla 22. Tiempos de 3 Línea de Calor.**

RELOJ								
1 LINEA DE CALOR			2 LINEA DE CALOR			3 LINEA DE CALOR		
HORA COMIENZO	13:17:00		HORA COMIENZO	13:22:00		HORA COMIENZO	13:27:00	
HORA FINALIZACION	13:22:00		HORA FINALIZACION	13:27:00		HORA FINALIZACION	13:31:00	
TOTAL	0:05:00		TOTAL	0:05:00		TOTAL	0:04:00	
VIDEO								
COMIENZO	0:00:59		COMIENZO	0:06:43		COMIENZO	0:11:21	
PARADA	0:04:29	0:04:33	PARADA1	0:08:45	0:08:10	PARADA1	0:11:57	0:12:01
PARADA 2	0:00:00	0:00:00	PARADA 2	0:10:34	0:10:37	PARADA 2	0:12:38	0:12:43
PARADA 3	0:00:00	0:00:00	PARADA 3	0:00:00	0:00:00	PARADA 3	0:13:54	0:13:59
FIN	0:06:23		FIN	0:11:08		FIN	0:15:40	
TOTAL	0:05:20		TOTAL	0:05:03		TOTAL	0:04:25	

Como podemos observar en la **Tabla 22**, los tiempos de comienzo de la realización de cada línea de calor, como por los tiempos tomados en los videos no observamos mucha desviación de tiempos. Por lo tanto, para obtener la velocidad de calentamiento de una línea tomamos los tiempos de los videos.

- $Velocidad\ 1^{\circ}\ linea\ de\ calor = \frac{1000\ mm}{(5\ min \times (\frac{60\ s}{1\ min})) + 20\ s} = 3,1\ mm/s$
- $Velocidad\ 2^{\circ}\ linea\ de\ calor = \frac{1000\ mm}{(5\ min \times (\frac{60\ s}{1\ min})) + 3\ s} = 3,3\ mm/s$
- $Velocidad\ 3^{\circ}\ linea\ de\ calor = \frac{1000\ mm}{(4\ min \times (\frac{60\ s}{1\ min})) + 25\ s} = 3,77\ mm/s$

Volvemos al 1º ensayo ya que le hemos dejado de enfriar tras haber realizado la primera línea de calor. Como se ha comentado anteriormente, se habían trazado otras dos líneas a una distancia de 125 mm a cada lado de la línea trazada previamente en sentido longitudinal.

En este caso se muestran los datos de tiempo tanto de la primera línea como de las dos líneas posteriores realizadas tras una para de enfriamiento.

**Tabla 23. Tiempos de 3 Línea de Calor y con descanso tras la realización de 1 Línea de Calor**

RELOJ								
1 LINEA DE CALOR			2 LINEA DE CALOR			3 LINEA DE CALOR		
HORA COMIENZO	13:00:00		HORA COMIENZO	13:39:00		HORA COMIENZO	13:45:00	
HORA FINALIZACION	13:05:00		HORA FINALIZACION	13:45:00		HORA FINALIZACION	13:50:00	
TOTAL	0:05:00		TOTAL	0:06:00		TOTAL	0:05:00	
VIDEO								
COMIENZO	0:00:13		COMIENZO	0:00:35		COMIENZO	0:06:17	
PARADA 1	0:03:08	0:03:12	PARADA 1	0:02:31	0:02:38	PARADA 1	0:07:34	0:07:40
PARADA 2	0:00:00	0:00:00	PARADA 2	0:03:02	0:03:08	PARADA 2	0:08:45	0:08:50
PARADA3	0:00:00	0:00:00	PARADA3	0:03:46	0:03:52	PARADA3	0:09:54	0:09:58
PARADA 4	0:00:00	0:00:00	PARADA 4	0:04:16	0:04:23	PARADA 4	0:00:00	0:00:00
FIN	0:05:08		FIN	0:06:06		FIN	0:11:25	
TOTAL	0:04:51		TOTAL	0:05:05		TOTAL	0:04:53	
RELOJ			VIDEO			TOTAL		
TOTAL LINEA 1	0:05:00		TOTAL LINEA 1	0:04:51		TOTAL RELOJ	0:16:00	
TOTAL LINEA 2 Y 3	0:11:00		TOTAL LINEA 2Y 3	0:09:58		TOTAL VIDEO	0:14:49	
DESCANSO	0:34:00							

A continuación, se calculan las velocidades de las diferentes líneas de calor, dichos tiempos los cogemos de la **Tabla 23**:

$$\begin{aligned}
 - \text{Velocidad 1ª línea de calor} &= \frac{1000 \text{ mm}}{(4 \text{ min} \times (60 \text{ s}/1 \text{ min})) + 51 \text{ s}} = 3,41 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \\
 - \text{Velocidad 2ª línea de calor} &= \frac{1000 \text{ mm}}{(5 \text{ min} \times (60 \text{ s}/1 \text{ min})) + 5 \text{ s}} = 3,28 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \\
 - \text{Velocidad 3ª línea de calor} &= \frac{1000 \text{ mm}}{(4 \text{ min} \times (60 \text{ s}/1 \text{ min})) + 53 \text{ s}} = 3,41 \frac{\text{mm}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Teniendo los datos tanto de tiempo y velocidad de los diferentes casos, ya podríamos proceder a realizar los modelos numéricos y comparar los resultados con los obtenidos en el modelo real del cual comentaremos en el siguiente punto los datos obtenidos.



### 3.3.3. *Ejecución de los ensayos.*

Una vez dispuesto el material y teniendo las especificaciones de trabajo se procedió a hacer la llama, utilizando también una fuente de calor con una llama carburante (más gas combustible, cuya flama es de color amarillo), colocando la boquilla del soplete a una altura de 1cm de la placa, se aplicó calor a una temperatura de 500 °C, una vez la chapa se calienta presentando un color rojizo sin fundirse, se empieza a avanzar, desplazando el soplete a lo largo de la línea de acuerdo a las respectivas técnicas.

Durante el procedimiento se regula la velocidad de avance del soplete según los tiempos anteriores, se verifica el consumo de oxígeno y gas propano al final de la aplicación del calor y se enfría a temperatura ambiente aproximadamente 2 hrs., hasta que esté completamente fría la probeta, tomando nuevamente las medidas y estos datos se tabularon en la planilla. Es importante observar que las características de la llama se mantuvieron hasta realizar cada una de las técnicas para garantizarles las mismas condiciones a todas.

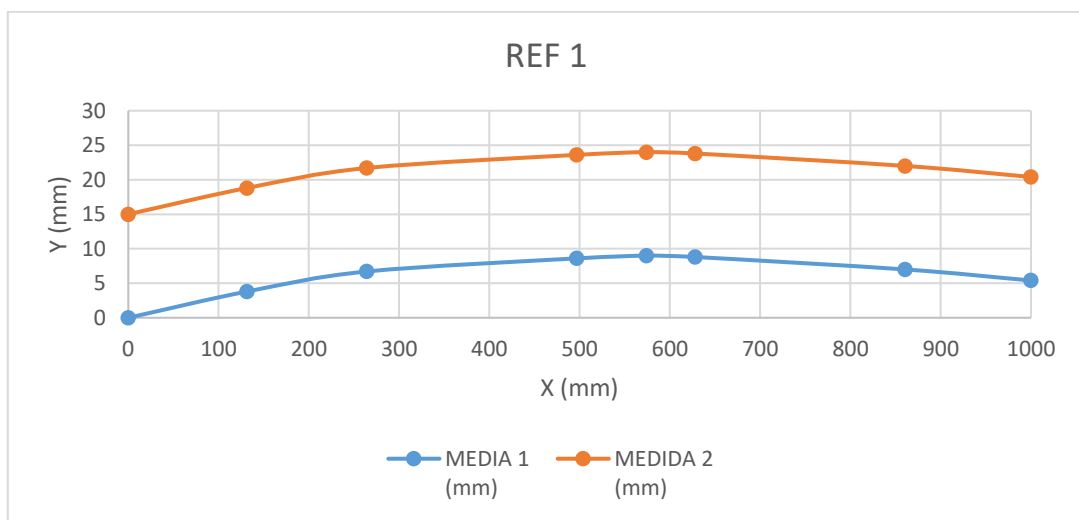
A continuación, se presentan unas imágenes que hacen referencia a lo comentado a los datos obtenidos del ensayo, ya que en el siguiente punto intentaremos obtener esos datos mediante la simulación en ANSYS.

#### - **PLACA 1 (1 línea)**

**Tabla 24. Medidas de 1 Línea de Calor (REF 1).**

REF 1			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	0	15
ZONA 1	131,6	3,8	18,8
ZONA 2	264,2	6,7	21,7
ZONA 3	496,7	8,6	23,6
ZONA 4	573,9	9	24
ZONA 5	627,8	8,8	23,8
ZONA 6	860,4	7	22
FIN	1000	5,4	20,4

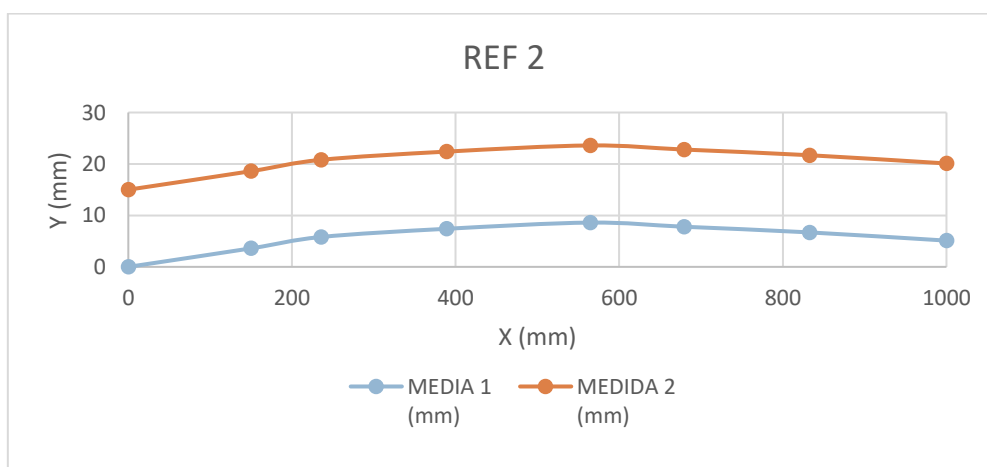




**Ilustración 51. Gráfica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 1).**

**Tabla 25 Medidas de 1 Línea de Calor (REF 2).**

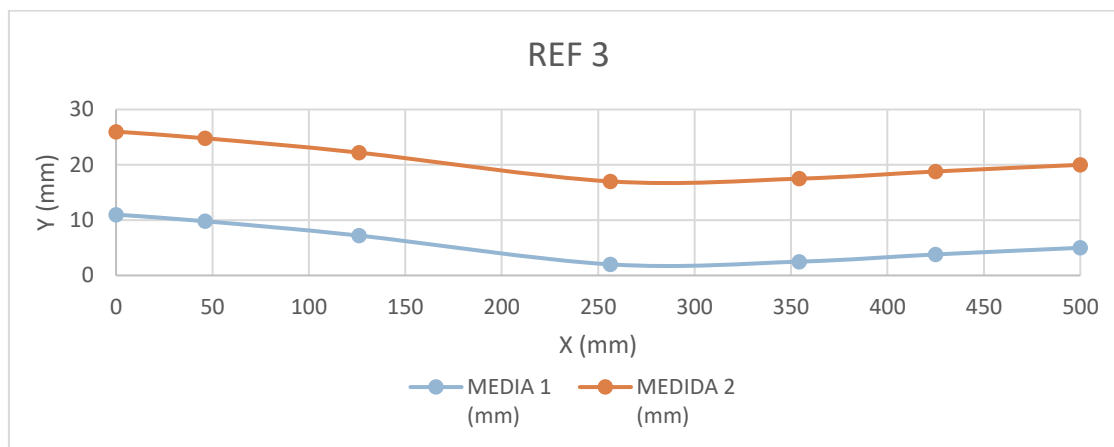
REF 2			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	0	15
ZONA 1	150	3,6	18,6
ZONA 2	235,4	5,8	20,8
ZONA 3	389	7,4	22,4
ZONA 4	564,6	8,6	23,6
ZONA 5	679,2	7,8	22,8
ZONA 6	832,5	6,7	21,7
FIN	1000	5,1	20,1



**Ilustración 52. Gráfica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 2).**

**Tabla 26. Medidas de 1 Línea de Calor (REF 3).**

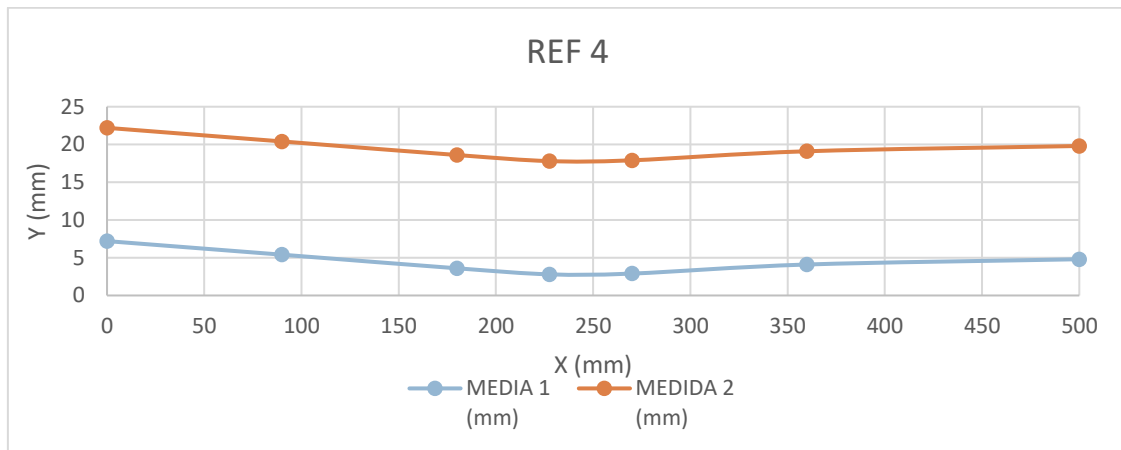
REF 3			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	11	26
ZONA 1	46,2	9,8	24,8
ZONA 2	126,1	7,2	22,2
ZONA 3	256,4	2	17
ZONA 4	354,3	2,5	17,5
ZONA 5	425,0	3,8	18,8
FIN	500	5	20



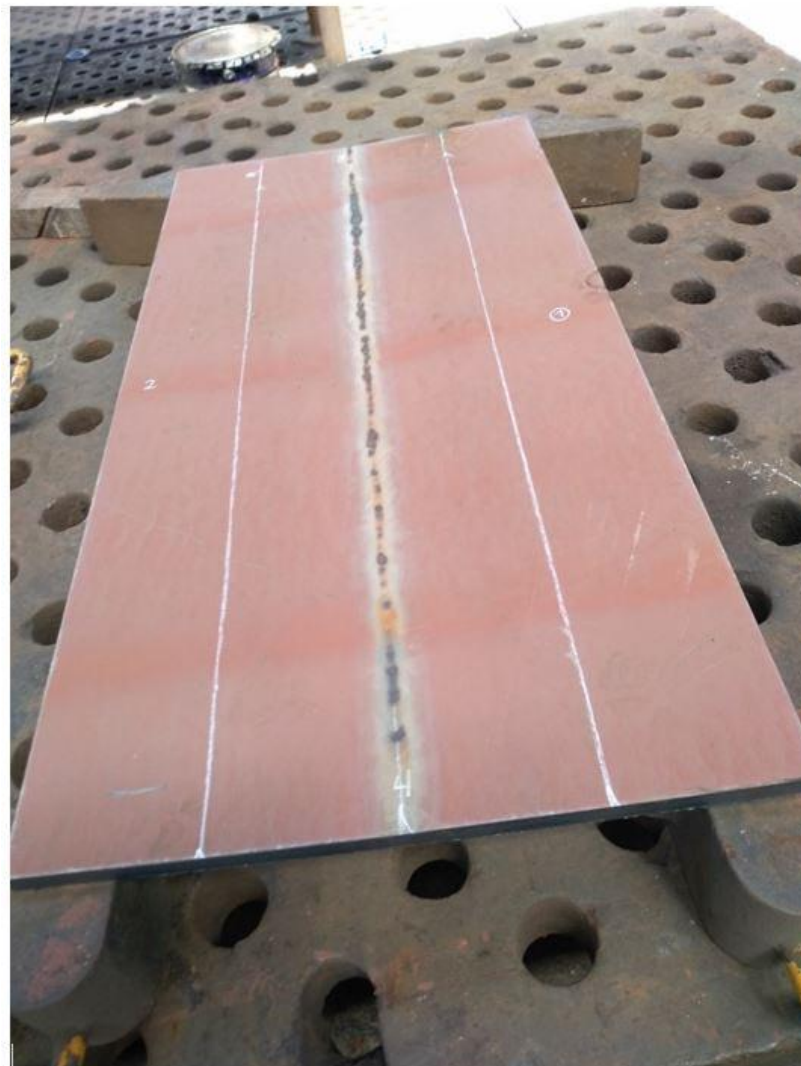
**Ilustración 53. Gráfica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 3).**

**Tabla 27. Medidas de 1 Línea de Calor (REF 4).**

REF 4			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	7,2	22,2
ZONA 1	90	5,4	20,4
ZONA 2	180	3,6	18,6
ZONA 3	227,5	2,8	17,8
ZONA 4	270	2,9	17,9
ZONA 5	360	4,1	19,1
FIN	500	4,8	19,8



**Ilustración 54. Gráfica de las medidas de 1 Línea de Calor (REF 4).**

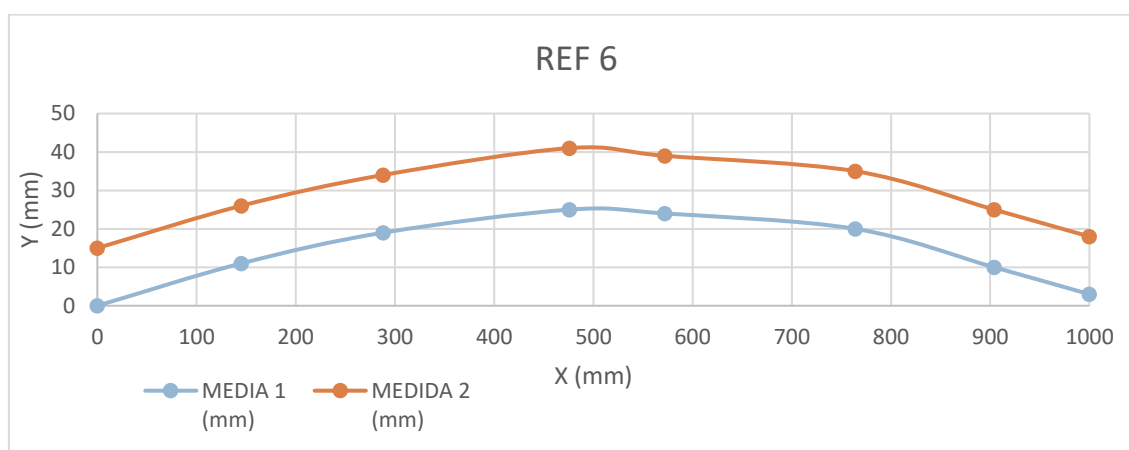


**Ilustración 55. Imagen de la placa después de haber trazo 1 línea de calor**

- **PLACA 2 (3 líneas)**

**Tabla 28. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 6).**

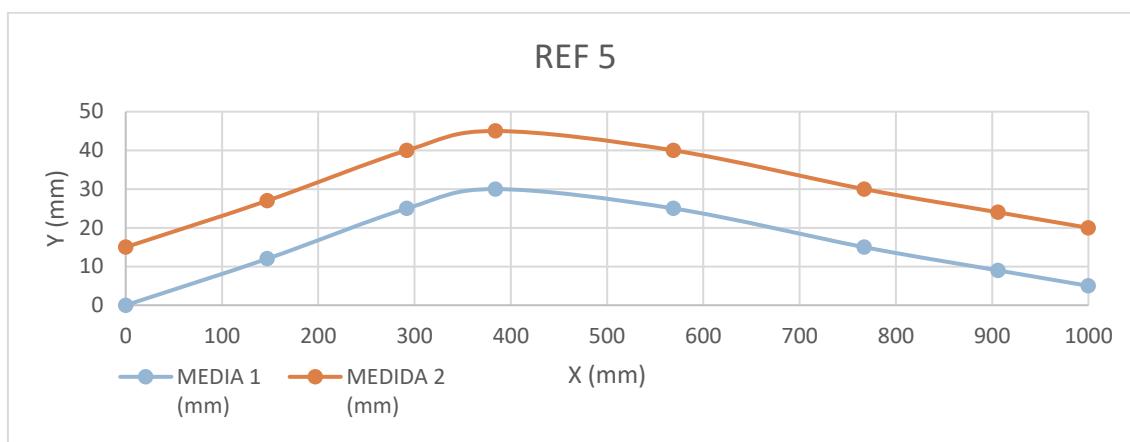
REF 6			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	0	15
ZONA 1	145	11	26
ZONA 2	288	19	34
ZONA 3	476	25	41
ZONA 4	572	24	39
ZONA 5	764	20	35
ZONA 6	904	10	25
FIN	1000	3	18



**Ilustración 56. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 6).**

**Tabla 29. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 5).**

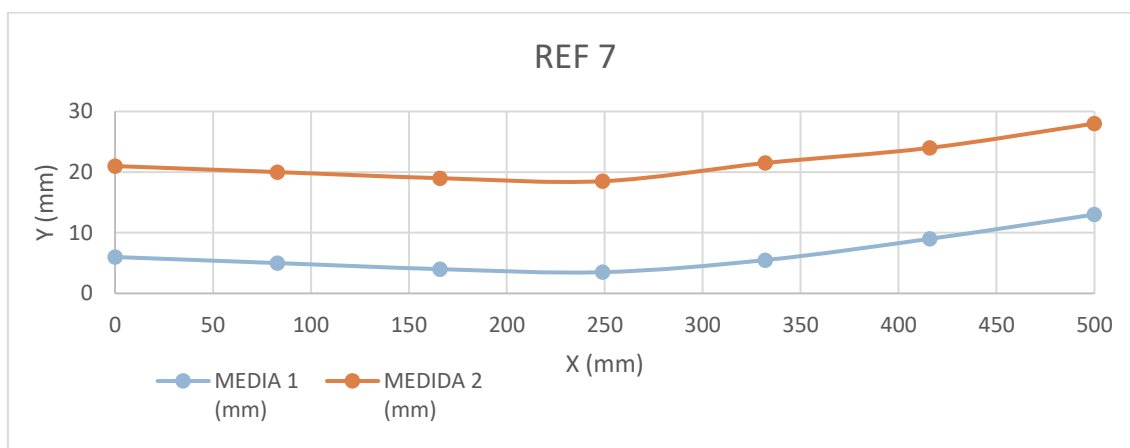
REF 5			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	0	15
ZONA 1	147	12	27
ZONA 2	292	25	40
ZONA 3	384	30	45
ZONA 4	569	25	40
ZONA 5	767	15	30
ZONA 6	906	9	24
FIN	1000	5	20



**Ilustración 57. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 5).**

**Tabla 30. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 7).**

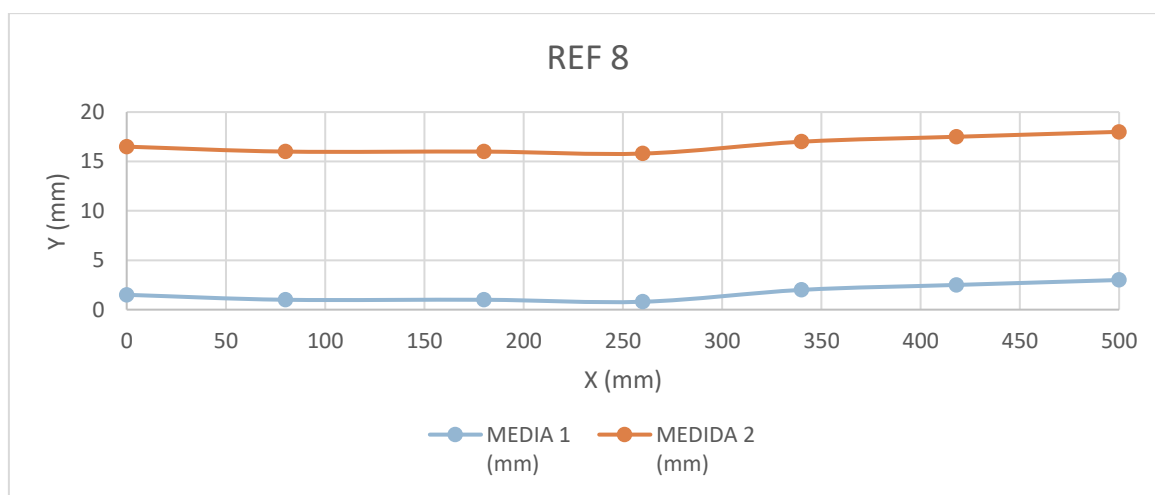
REF 7			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	6	21
ZONA 1	83	5	20
ZONA 2	166	4	19
ZONA 3	249	3,5	18,5
ZONA 4	332	5,5	21,5
ZONA 5	416	9	24
FIN	500	13	28



**Ilustración 58. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 7).**

**Tabla 31. Medidas de 3 Línea de Calor (REF 8).**

REF 8			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPIO	0	1,5	16,5
ZONA 1	80	1	16
ZONA 2	180	1	16
ZONA 3	260	0,8	15,8
ZONA 4	340	2	17
ZONA 5	418	2,5	17,5
FIN	500	3	18



**Ilustración 59. Gráfica de las medidas de 3 Línea de Calor (REF 8).**

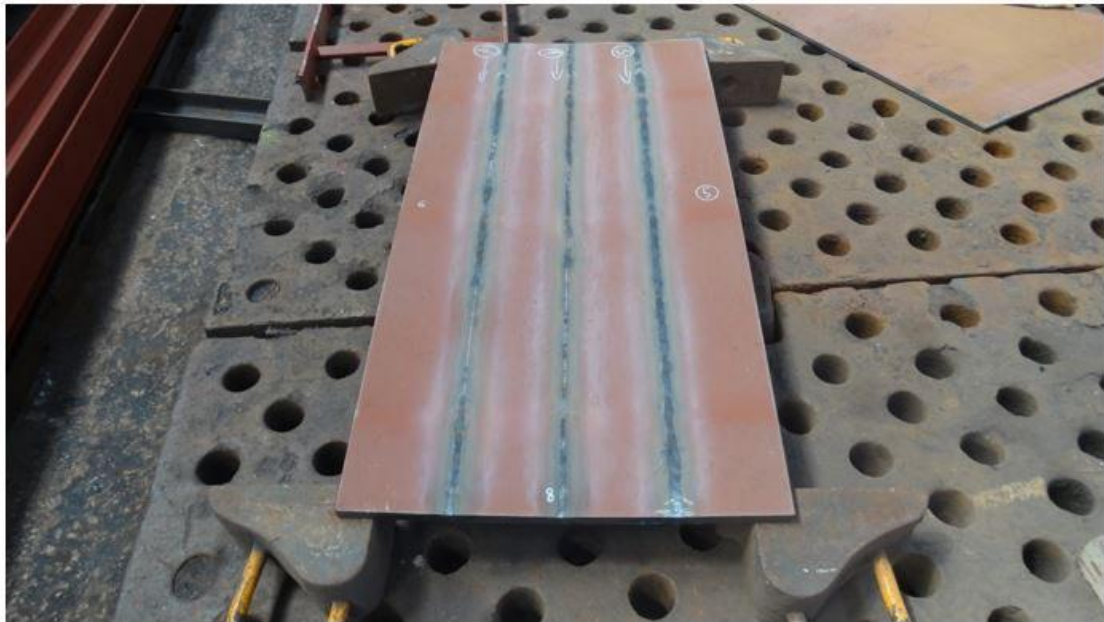
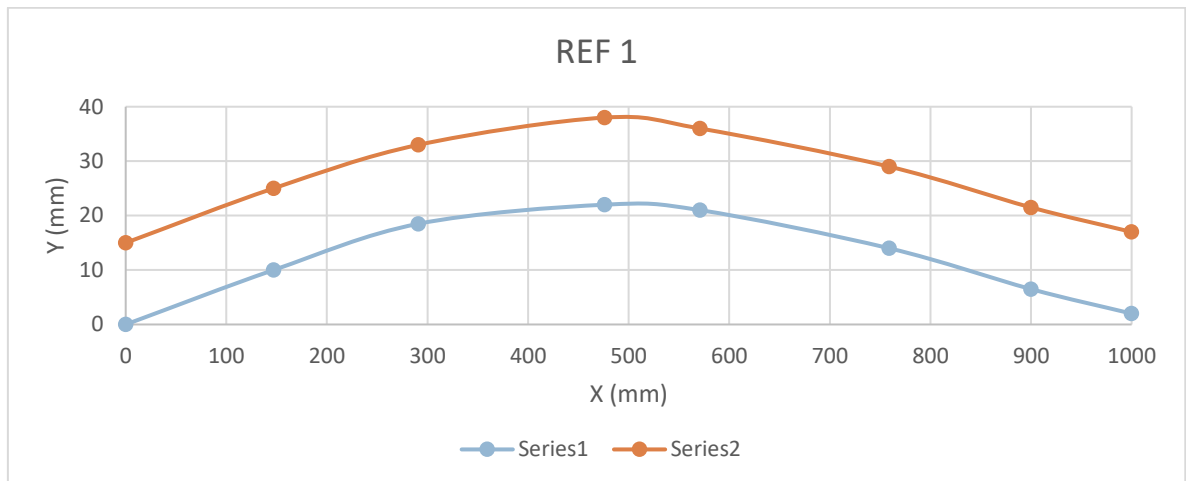


Ilustración 60.. Imagen de la placa después de haber trazo 3 línea de calor

- **PLACA 1 (3 líneas) (con las 3 líneas, las 2 últimas después de un tiempo)**

Tabla 32. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 1).

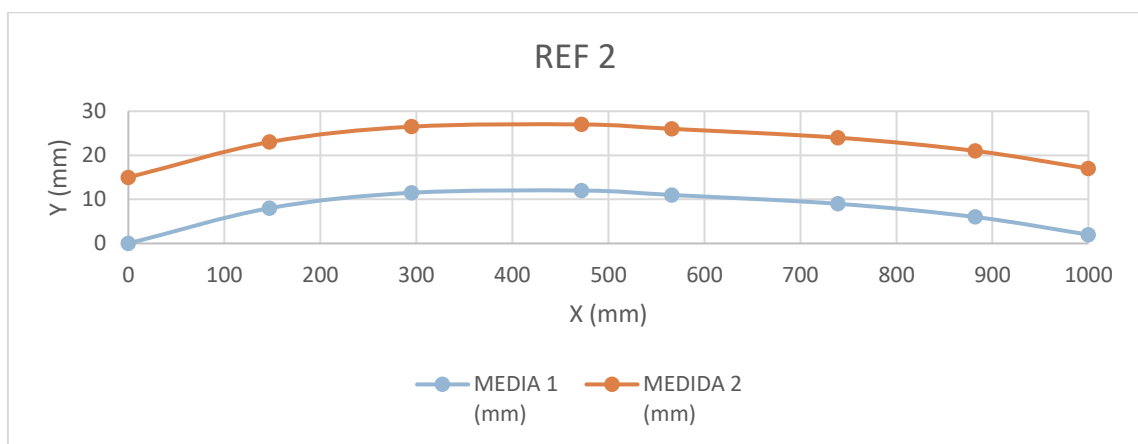
REF 1			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	0	15
ZONA 1	147	10	25
ZONA 2	291	18,5	33
ZONA 3	476	22	38
ZONA 4	571	21	36
ZONA 5	759	14	29
ZONA 6	900	6,5	21,5
FIN	1000	2	17



**Ilustración 61. Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 1).**

**Tabla 33. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 2).**

REF 2			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	0	15
ZONA 1	147	8	23
ZONA 2	295	11,5	26,5
ZONA 3	472	12	27
ZONA 4	566	11	26
ZONA 5	739	9	24
ZONA 6	882	6	21
FIN	1000	2	17

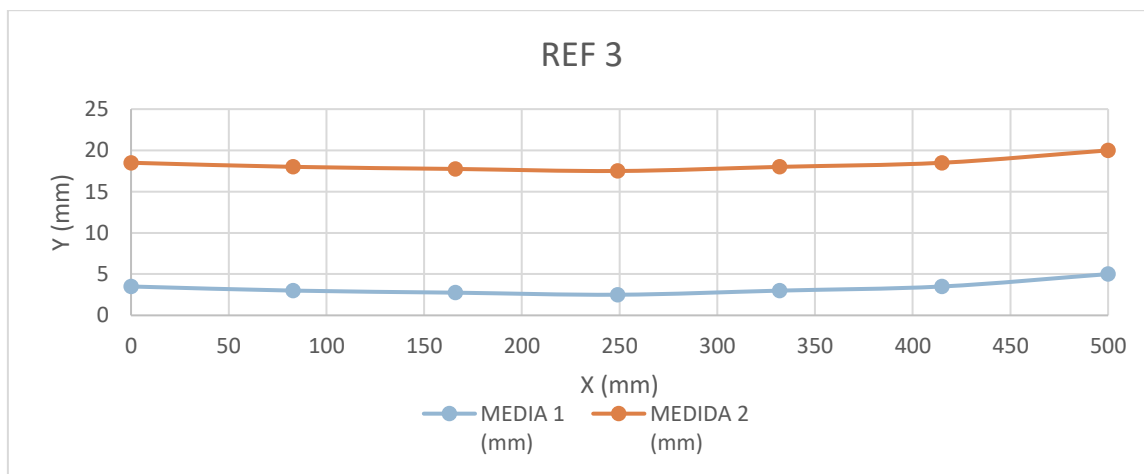


**Ilustración 62. Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 2).**



**Tabla 34. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 3).**

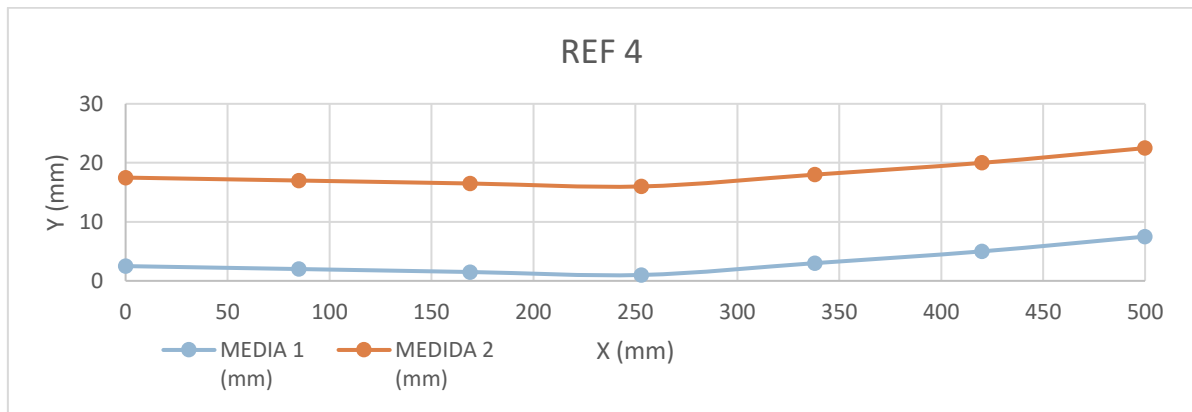
REF 3			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	3,5	18,5
ZONA 1	83	3	18
ZONA 2	166	2,75	17,75
ZONA 3	249	2,5	17,5
ZONA 4	332	3	18
ZONA 5	415	3,5	18,5
FIN	500	5	20



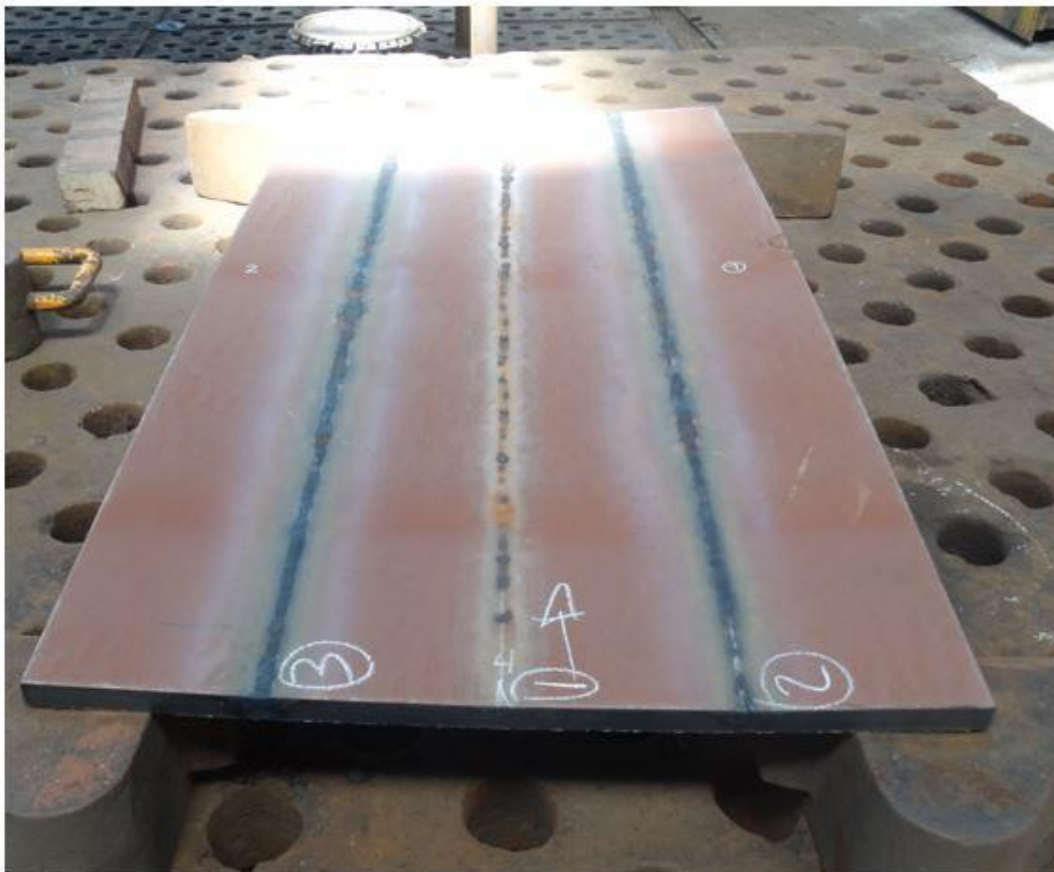
**Ilustración 63. Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 3).**

**Tabla 35. Medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 4).**

REF 4			
	X	MEDIA 1 (mm)	MEDIDA 2 (mm)
PRINCIPO	0	2,5	17,5
ZONA 1	85	2	17
ZONA 2	169	1,5	16,5
ZONA 3	253	1	16
ZONA 4	338	3	18
ZONA 5	420	5	20
FIN	500	7,5	22,5



**Ilustración 64.** Gráfica de las medidas de 3 (2 ultimas después de un tiempo) Línea de Calor (REF 4).



**Ilustración 65.** Imagen de la placa después de haber trazo 3 línea de calor (2 ultimas después de un tiempo).

### **3.4. EXPLICACIÓN DE LAS FASES DE MODELADO EN ANSYS.**

Como se ha señalado en repetidas ocasiones a lo largo del trabajo, una de las principales limitaciones del curvado por líneas de calor procede del hecho de que, alcanzar la configuración deseada, es necesario acudir a un proceso de ensayo y error. En el mejor de los casos, la pericia adquirida por el operario tras la repetición del proceso puede agilizar el proceso, aunque no siempre se puede garantizar el éxito.

El principal objetivo del trabajo se ha analizado la posibilidad de emplear herramientas de simulación numérica por Elementos Finitos con objeto de predecir las modificaciones geométricas por elementos estructurales de acero sometidos a un proceso de curvado por líneas de calor. Partiendo de un patrón de calentamiento aplicado sobre el componente, de las características de las llamas (propiedades térmicas y mecánicas) debe ser posible determinar, no solo los campos de deformaciones permanentes (y, a partir de ellos, la deformación final del elemento), sino también la distribución de tensiones residuales.

- Primeramente, se ha caracterizado las propiedades de la llama empleada, modelando la potencia calorífica suministrada al material en cada punto. Para esta calibración se ha desarrollado unos modelos térmicos por Elementos Finitos.
- En segundo lugar, se ha modelado numéricamente el comportamiento termomecánico del material con el fin de pronosticar las deformaciones inducidas por el tratamiento de curvado por líneas de calor; el ensayo con el acero S275 se ha validado con el experimento anteriormente comentado.

Finalmente, se ha realizado un modelado por elementos finitos en otro acero como es un AH32, que tiene características algo similares a los aceros estructurales.

### **3.4.1. Propiedades del Material.**

#### **3.4.1.1. Propiedades S275**

Se configura un material para el análisis, El material principal se corresponde a un acero estructural S275. A lo largo de este apartado se recogen las distintas propiedades que han obtenido del material. Las propiedades térmicas y estructurales han sido obtenidas del ASME.

**Tabla 36. Densidad del S275**

Densidad
Kg/m <sup>3</sup>
<b>7750</b>

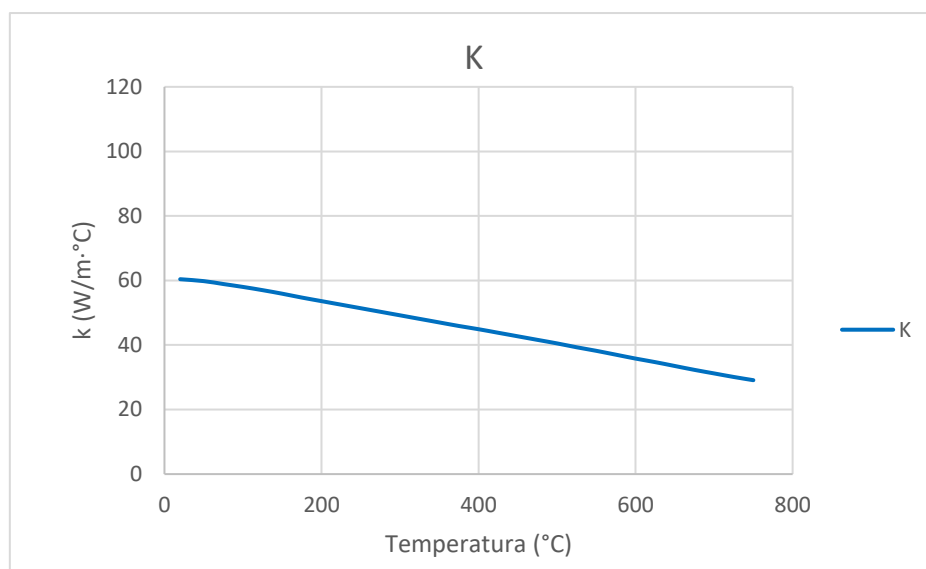
**Tabla 37. Temperatura de fusión S275**

Temperatura (°C)
<b>1516</b>

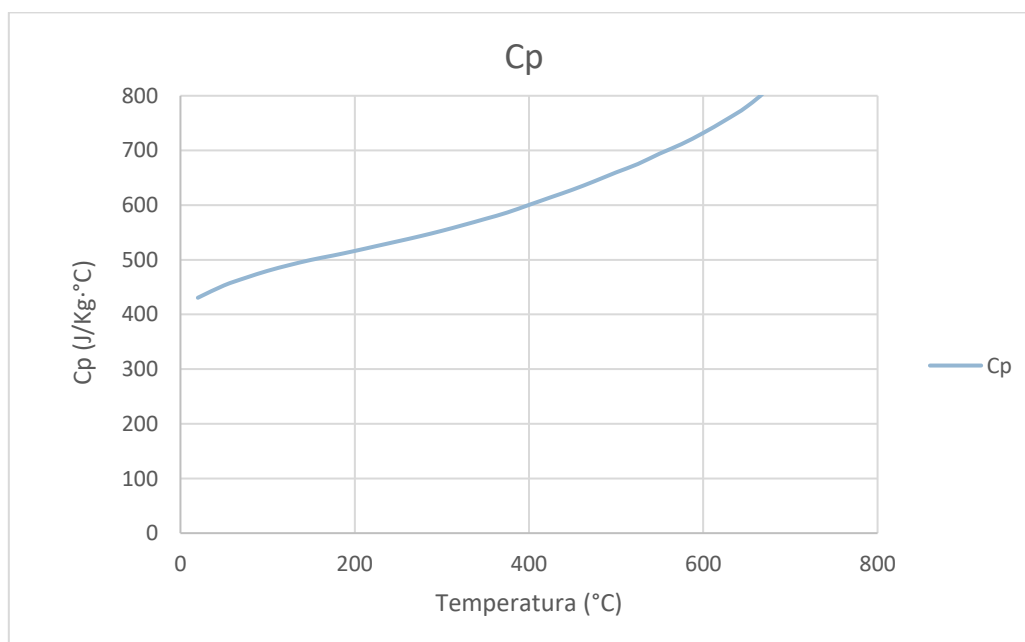
**Tabla 38. Propiedades térmicas del S275.**

T	Conductividad	Conductividad	Calor específico
°C	W/(mm°C)	W/(m·°C)	J/(Kg·°C)
<b>20,0</b>	0,0604	60,4	430,6
<b>50,0</b>	0,0598	59,8	453,1
<b>75,0</b>	0,0589	58,9	467,1
<b>100,0</b>	0,058	58	479,7
<b>125,0</b>	0,057	57	490,3
<b>150,0</b>	0,0559	55,9	499,9
<b>175,0</b>	0,0547	54,7	507,8
<b>200,0</b>	0,0536	53,6	516,1
<b>225,0</b>	0,0525	52,5	525,1
<b>250,0</b>	0,0514	51,4	534,0
<b>275,0</b>	0,0503	50,3	543,1
<b>300,0</b>	0,0492	49,2	553,0
<b>325,0</b>	0,0481	48,1	563,7
<b>350,0</b>	0,047	47	574,8
<b>375,0</b>	0,0459	45,9	586,4
<b>400,0</b>	0,0449	44,9	600,4
<b>425,0</b>	0,0438	43,8	614,3
<b>450,0</b>	0,0427	42,7	628,2
<b>475,0</b>	0,0416	41,6	643,6
<b>500,0</b>	0,0405	40,5	659,8

<b>525,0</b>	0,0393	39,3	675,2
<b>550,0</b>	0,0382	38,2	694,2
<b>575,0</b>	0,037	37	711,5
<b>600,0</b>	0,0358	35,8	732,1
<b>625,0</b>	0,0347	34,7	755,0
<b>650,0</b>	0,0335	33,5	780,2
<b>675,0</b>	0,0323	32,3	815,6
<b>700,0</b>	0,0312	31,2	877,1
<b>725,0</b>	0,0301	30,1	1011,4
<b>750,0</b>	0,0291	29,1	1551,6



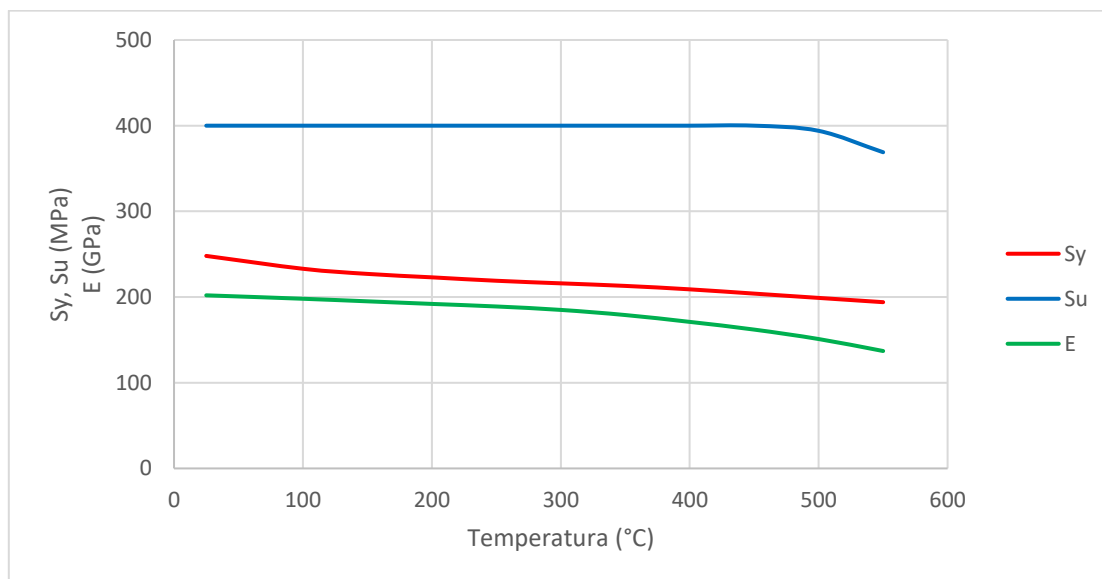
**Ilustración 66. Conductividad térmica del S275**



**Ilustración 67, Calor específico del S275**

**Tabla 39. Propiedades estructurales del S275.**

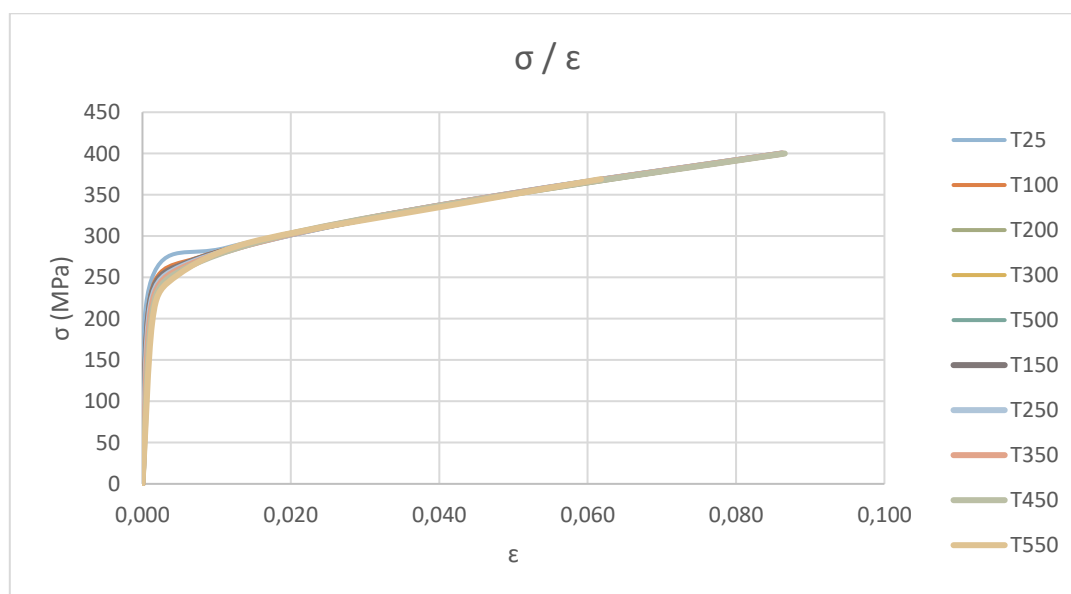
T	Modulo E	Coef. Poisson	Lím Elástico	Lím. Ultimo
(°C)	(Gpa)	[v]	(MPa)	(MPa)
25	202	0,3	248	400
100	198	0,3	233	400
150	195	0,3	227	400
200	192	0,3	223	400
250	189	0,3	219	400
300	185	0,3	216	400
350	179	0,3	213	400
400	171	0,3	209	400
450	162	0,3	204	400
500	151	0,3	199	394
550	137	0,3	194	369



**Ilustración 68. Propiedades estructurales del S275**

**Tabla 40. tensión/Deformación a diferentes temperaturas del S275.**

T (°C)	25					
$\sigma_t$	0	248	286	324	362	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0012	0,0113	0,0329	0,0564	0,0861
T (°C)	100					
$\sigma_t$	0	233	274,75	316,5	358,25	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0012	0,0077	0,0282	0,0540	0,0861
T (°C)	150					
$\sigma_t$	0	227	268,75	310,5	352,25	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0012	0,0063	0,0243	0,0503	0,0862
T (°C)	200					
$\sigma_t$	0	223	261	299	337	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0012	0,0050	0,0175	0,0410	0,0862
T (°C)	250					
$\sigma_t$	0	219	264,25	309,5	354,75	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0012	0,0055	0,0238	0,0519	0,0862
T (°C)	300					
$\sigma_t$	0	216	262	308	354	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,001168	0,0052	0,0229	0,0515	0,0863
T (°C)	350					
$\sigma_t$	0	213	259,75	306,5	353,25	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0011899	0,0049	0,0220	0,0510	0,0863
T (°C)	400					
$\sigma_t$	0	209	256,75	304,5	352,25	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0012	0,0045	0,0209	0,0505	0,0864
T (°C)	450					
$\sigma_t$	0	204	253	302	351	400
$\epsilon_t$	0,0000	0,0013	0,0042	0,0195	0,0498	0,0866
T (°C)	500					
$\sigma_t$	0	199	248	297	346	394
$\epsilon_t$	0,0000	0,0013	0,0038	0,0168	0,0469	0,0814
T (°C)	550					
$\sigma_t$	0	194	243	292	341	369
$\epsilon_t$	0,0000	0,0013	0,0033	0,0143	0,0439	0,0618

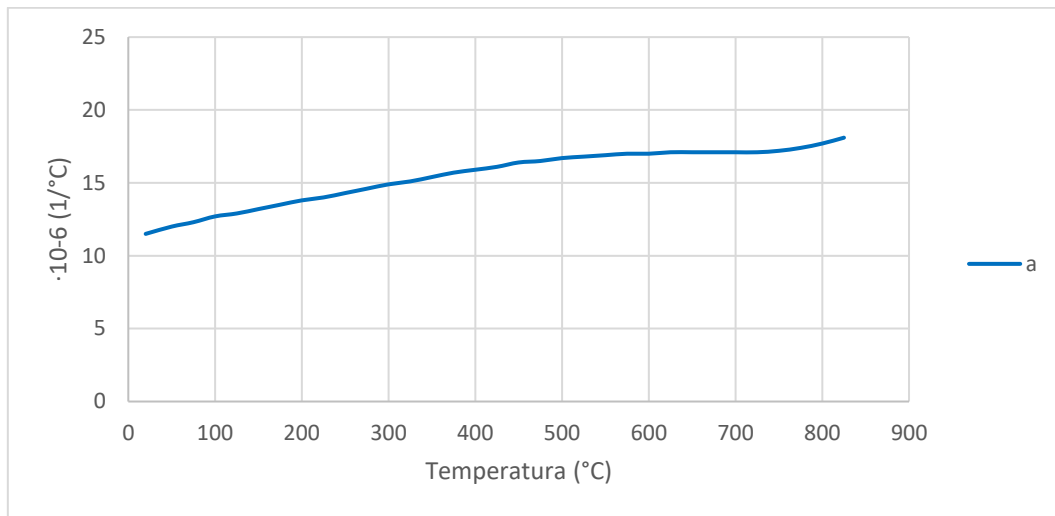


**Ilustración 69. Tensión/Deformación a diferentes temperaturas S275**

**Tabla 41. Coeficiente de expansión térmica S275.**

T	Instantaneous coefficient of thermal linear expansion $\alpha$
°C	$10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$
20	11,5
50	12
75	12,3
100	12,7
125	12,9
150	13,2
175	13,5
200	13,8
225	14
250	14,3
275	14,6
300	14,9
325	15,1
350	15,4
375	15,7
400	15,9
425	16,1
450	16,4
475	16,5
500	16,7
525	16,8
550	16,9
575	17
600	17
625	17,1
650	17,1
675	17,1
700	17,1
725	17,1
750	17,2
775	17,4
800	17,7
825	18,1





**Ilustración 70. Coeficiente de expansión térmica S275**

### 3.4.1.2. *Propiedades AH32.*

Se configura un material para el análisis, El material principal se corresponde a un acero estructural AH32 A lo largo de este apartado se recogen las distintas propiedades que han obtenido del material. Las propiedades térmicas y estructurales han sido obtenidas del ASME.

**Tabla 42.Densidad AH32**

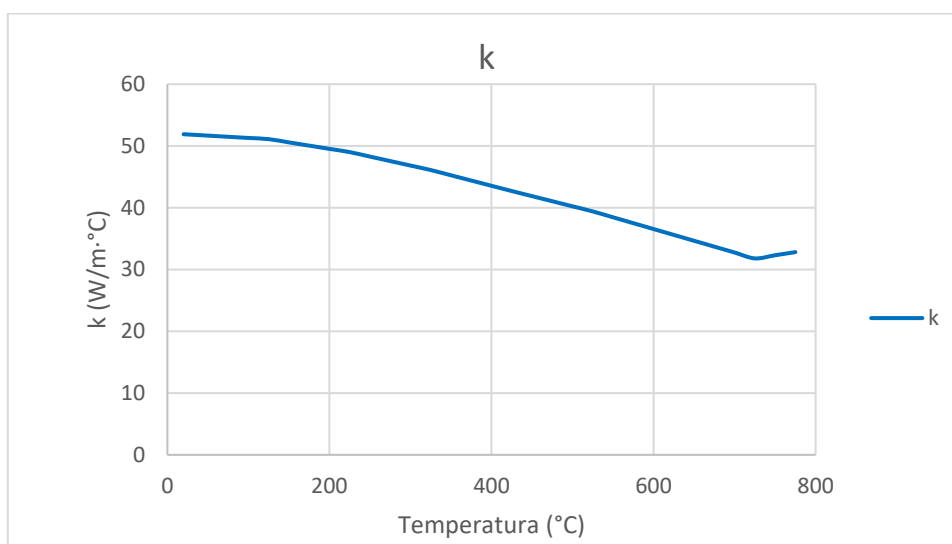
Densidad
Kg/m <sup>3</sup>
<b>7880</b>

**Tabla 43. Temperatura de fusión AH32**

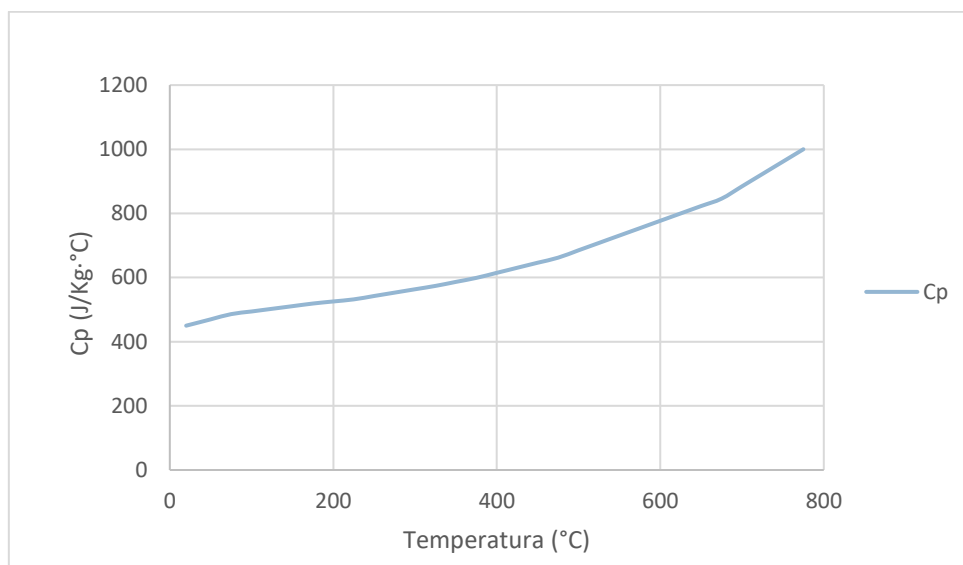
Temperatura (°C)
<b>1516</b>

T	Conductividad	Conductividad	Calor específico
°C	W/(mm°C)	W/(m·°C)	J/(Kg·°C)
<b>20</b>	0,0519	51,9	450
<b>50</b>	0,05167	51,67	469,64
<b>75</b>	0,05148	51,48	486
<b>100</b>	0,05129	51,29	494,25
<b>125</b>	0,05110	51,1	502,5
<b>150</b>	0,05058	50,575	510,75
<b>175</b>	0,05005	50,05	519
<b>200</b>	0,04953	49,525	525,5
<b>225</b>	0,04900	49	532
<b>250</b>	0,04828	48,275	542,5
<b>275</b>	0,04755	47,55	553
<b>300</b>	0,04683	46,825	563,5
<b>325</b>	0,04610	46,1	574
<b>350</b>	0,04525	45,25	586,5
<b>375</b>	0,04440	44,4	599
<b>400</b>	0,04355	43,55	614,75
<b>425</b>	0,04270	42,7	630,5
<b>450</b>	0,04188	41,875	646,25
<b>475</b>	0,04105	41,05	662
<b>500</b>	0,04023	40,225	685
<b>525</b>	0,03940	39,4	708

<b>550</b>	0,03845	38,45	731
<b>575</b>	0,03750	37,5	754
<b>600</b>	0,03655	36,55	777
<b>625</b>	0,03560	35,6	800
<b>650</b>	0,03465	34,65	823
<b>675</b>	0,03370	33,7	846
<b>700</b>	0,03275	32,75	884,5
<b>725</b>	0,03180	31,8	923
<b>750</b>	0,03231	32,31	961,5
<b>775</b>	0,03281	32,81	1000



**Ilustración 71. Conductividad térmica del AH32**



**Ilustración 72. Calor específico del AH32**

T	Módulo E	Módulo E	Coef. Poisson	Lím Elástico	Lím. Último
°C	MPa	Gpa	[v]	MPa	MPa
<b>0</b>	206000	206	0,267	368,90	544,53
<b>50</b>	196000	196	0,29	350,91	523,18
<b>200</b>	196000	196	0,322	302,03	464,02
<b>250</b>	186000	186	0,296	287,30	445,82
<b>300</b>	186000	186	0,262	273,29	428,34
<b>400</b>	166000	166	0,24	247,28	395,41
<b>450</b>	157000	157	0,229	235,22	379,91
<b>500</b>	157000	157	0,223	223,75	365,01
<b>600</b>	135000	135	0,223	202,46	336,95
<b>650</b>	117000	117	0,223	192,58	323,73
<b>700</b>	112000	112	0,233	183,19	311,04
<b>800</b>	113000	113	0,233	165,76	287,13

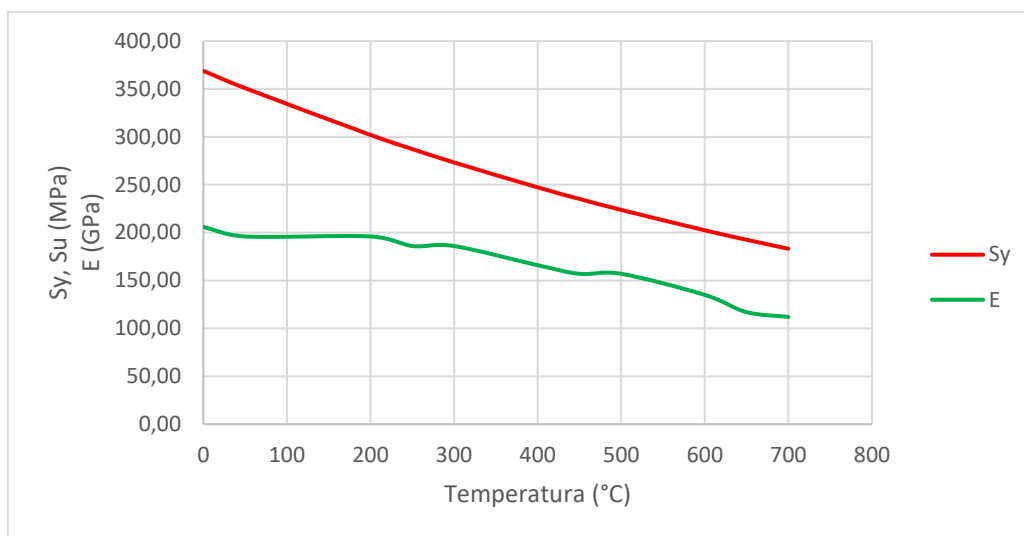
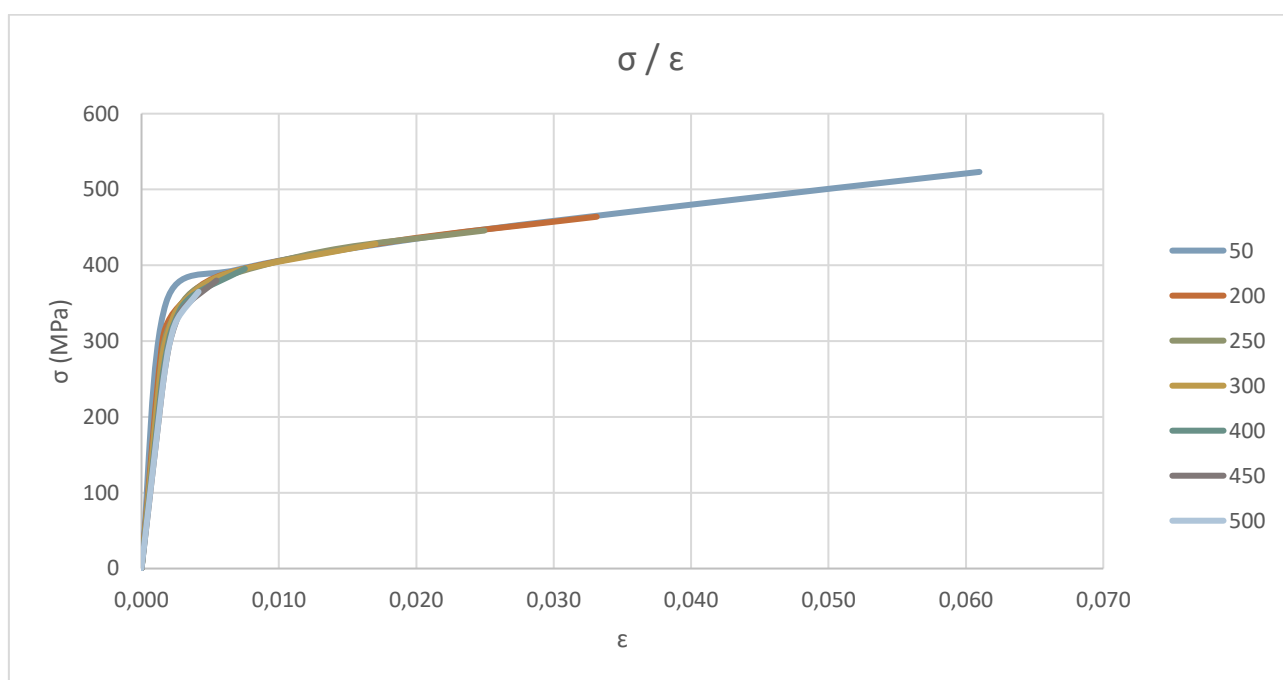


Ilustración 73. Propiedades estructurales del AH32

Tabla 44. tensión/Deformación a diferentes temperaturas del AH32

T (°C)	0					
$\sigma_t$	0	368,9	412,81	456,72	500,62	544,53
$\epsilon_t$	0,0000	0,0018	0,0112	0,0298	0,0492	0,0741
T (°C)	50					
$\sigma_t$	0	350,90	393,97	437,04	480,11	523,17
$\epsilon_t$	0,0000	0,0018	0,0069	0,0207	0,0401	0,0610
T (°C)	200					
$\sigma_t$	0	302,029	345,097	388,165	431,232	464,017
$\epsilon_t$	0,0000	0,0015	0,0027	0,0060	0,0181	0,0331
T (°C)	250					
$\sigma_t$	0	287,29960	331,21	375,11	419,02	445,823
$\epsilon_t$	0,0000	0,0015	0,0023	0,0046	0,0134	0,0250
T (°C)	300					
$\sigma_t$	0	273,287	312,0515	350,815	389,5788	428,342
$\epsilon_t$	0,0000	0,0015	0,0020	0,0030	0,0063	0,0170
T (°C)	400					
$\sigma_t$	0	247,28106	284,3133	321,345	358,3777	395,409 9352
$\epsilon_t$	0,0000	0,001490	0,0018	0,0023	0,0036	0,0075
T (°C)	450					
$\sigma_t$	0	235	271,3922	307,563	343,7345	379,905
$\epsilon_t$	0,0000	0,0014982	0,0018	0,0022	0,0031	0,0055
T (°C)	500					
$\sigma_t$	0	223,74916	259,06	294,38	329,69	365,009
$\epsilon_t$	0,0000	0,0014	0,0017	0,0020	0,0026	0,0042
T (°C)	600					

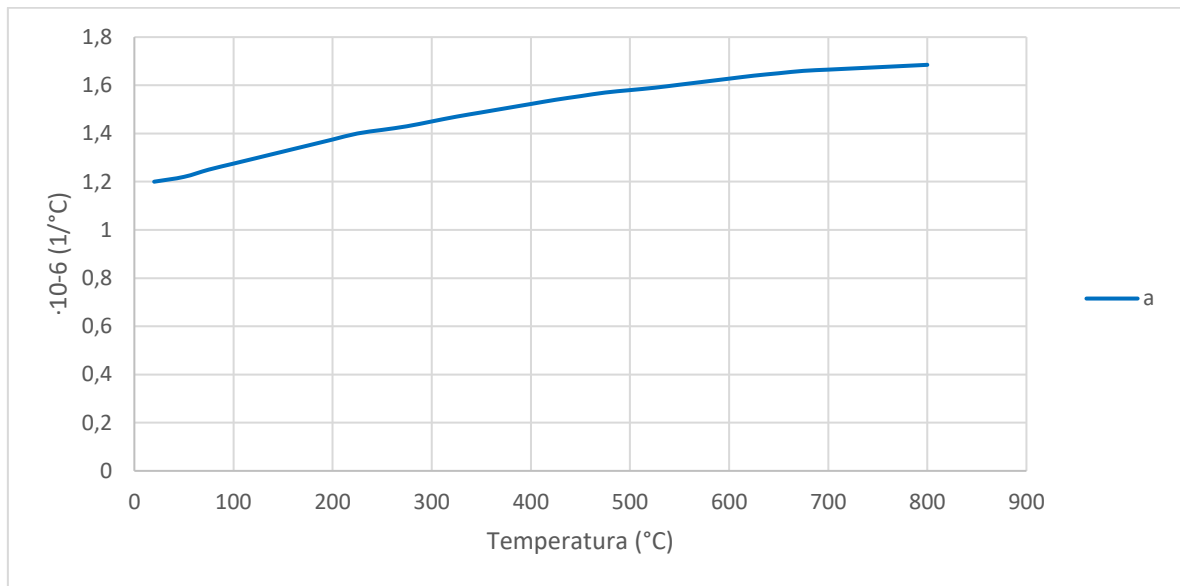
$\sigma_t$	0	202,45661	236,08	269,70	303,32	336,946
$\epsilon_t$	0,0000	0,0015	0,0018	0,0020	0,0024	0,0032
<b>T (°C)</b>	650					
$\sigma_t$	0	192,58268	226,21	259,83	293,45	323,734
$\epsilon_t$	0,0000	0,0016	0,0019	0,0023	0,0026	0,0032
<b>T (°C)</b>	700					
$\sigma_t$	0	183,19031	216,81	250,44	284,06	311,040
$\epsilon_t$	0,0000	0,0016	0,0019	0,0022	0,0025	0,0029
<b>T (°C)</b>	800					
$\sigma_t$	0	165,75745	199,38	233,00	266,62	287,126
$\epsilon_t$	0,0000	0,0014	0,0017	0,0020	0,0023	0,0026



**Ilustración 74. tensión/Deformación a diferentes temperaturas del AH32**

**Tabla 45. Coeficiente de expansión térmica AH32**

T	Instantaneous coefficient of thermal linear expansion $\alpha$
°C	$10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$
20	1,2
50	1,22
75	1,25
100	1,275
125	1,3
150	1,325
175	1,35
200	1,375
225	1,4
250	1,415
275	1,43
300	1,45
325	1,47
350	1,4875
375	1,505
400	1,5225
425	1,54
450	1,555
475	1,57
500	1,58
525	1,59
550	1,6025
575	1,615
600	1,6275
625	1,64
650	1,65
675	1,66
700	1,665
725	1,67
750	1,675
775	1,68
800	1,685



**Ilustración 75. Coeficiente de expansión térmica AH32**

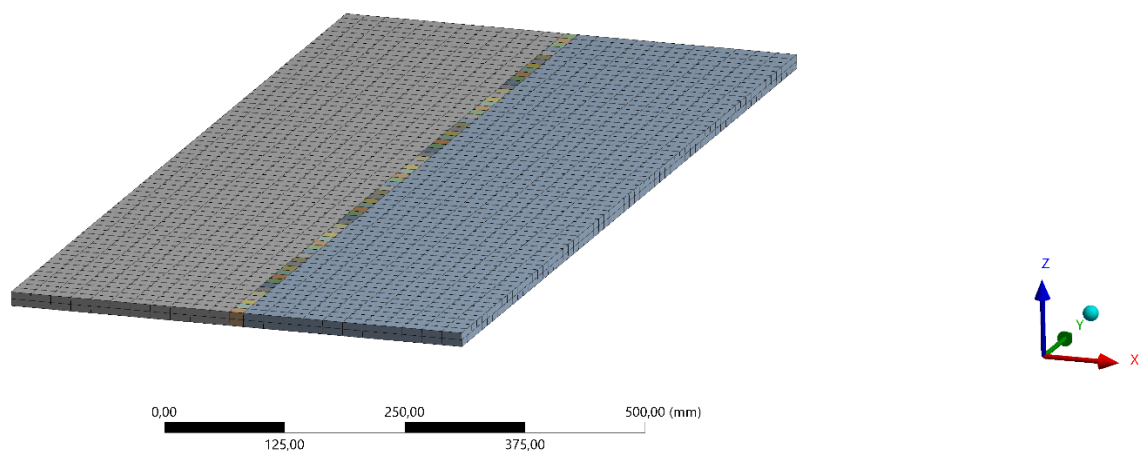


### **3.4.2. Geometría y Mallado.**

Los análisis mediante el método de los elementos finitos han sido realizados mediante el software de cálculo ANSYS r1 2020. Para ello se han construido dos modelos, uno térmico y otro estructural. Se trata de dos modelos acoplados para poder cargar resultados del análisis térmico sobre el análisis estructural, por lo que poseen el mismo número de nodos (17415) y elementos (3036), así como la misma numeración. La diferencia entre ellos radica en el tipo de elemento utilizado que, teniendo la misma geometría y numero de nodos, poseen propiedades distintas y almacenan distintos resultados:

- SOLID70: (análisis térmico): elemento hexaédrico de 8 nodos y un grado de libertad (temperatura). Elemento con capacidad de cálculo en análisis estacionarios y transitorios. Poseen la propiedad Vida/Muerte.
- SOLID185 (análisis estructural): elemento hexaédrico de 8 nodos y tres grados de libertad (traslaciones en las direcciones X, Y, Z). Elemento con capacidad de cálculo de plasticidad y grandes deformaciones. Poseen la propiedad Vida/Muerte.

Se ha realizado un mallado manual del cupón mediante elementos hexaédricos. Las zonas correspondientes a la zona han sido malladas con mayor densidad de elementos como se observa en **Ilustración 76** que asegura mayor precisión en los resultados, mientras que, en las zonas más alejadas, la densidad de elementos es menor.



**Ilustración 76. Mallado de una línea de calor**

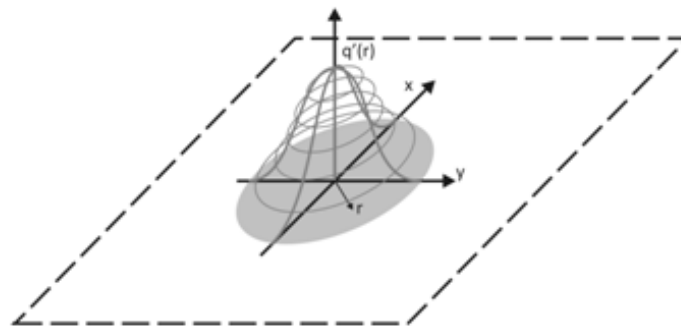
### 3.4.3. Análisis Térmico.

De acuerdo con Rykalin [53], la potencia calorífica unitaria (energía por unidad de tiempo y superficie) suministrada por una llama de esta naturaleza puede describirse por medio de una expresión gaussiana de la forma:

$$q(r) = qe^{-ke^2}$$

En la expresión anterior  $\hat{q}$  representa la máxima potencia calorífica (la que recibe el punto central de la superficie superior de la placa) mientras que  $k$  representa un parámetro que define la atenuación de la llama con la distancia. Puede demostrarse que  $k$  se relaciona con la distancia  $r_{0.05}$  siguiendo la fórmula. El parámetro  $r_{0.05}$  representa la distancia respecto del eje de simetría de la llama ( $r=0$ ) para la cual la potencia calorífica se ha atenuado en un 95% (es decir, en esta posición la potencia suministrada es del 5% de la máxima potencia).

$$k = \frac{3}{r_{0.05}^2}$$



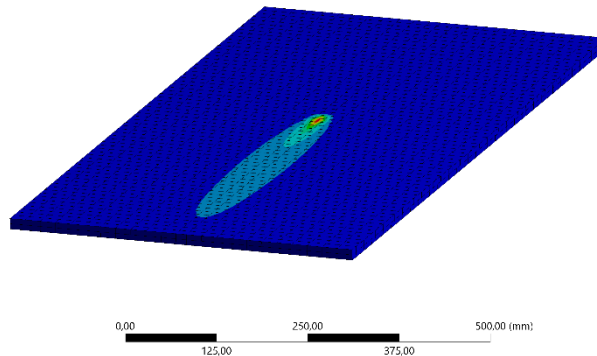
**Ilustración 77. Modelado 3D del aporte de calor**

En su trabajo [53] Rykailn propone una llama de propano los valores de  $r_{0.05} = 41,1 \text{ mm}$  y  $\hat{q}=5,21 \frac{J}{s.mm^2}$  para los parámetros típicos que rigen el aporte de calor de estas llamas; tomado estos valores

Los fenómenos de transferencia térmica que se han tenido en cuenta en el modelo de análisis han sido la conductividad y la convección hacia el exterior. La conductividad se ha configurado a través de las propiedades del material, mientras que la convección se ha introducido como una carga de valor  $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , correspondiente a convección natural a una temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ . La convección se ha aplicado sobre la carcasa exterior del modelo FEM, así como en la superficie superior de cada uno de los puntos de la chapa.

B: 1 Línea de Calor 3000J (A)  
Figure  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 158,73  
21/10/2020 18:43

1919,5 Max  
1707,5  
1495,4  
1283,4  
1071,3  
859,29  
647,25  
435,2  
223,15  
11,103 Min



**Ilustración 78. Aplicación de 1 Línea de Calor**

### ***3.4.3.1. Análisis del coeficiente de expansión térmica***

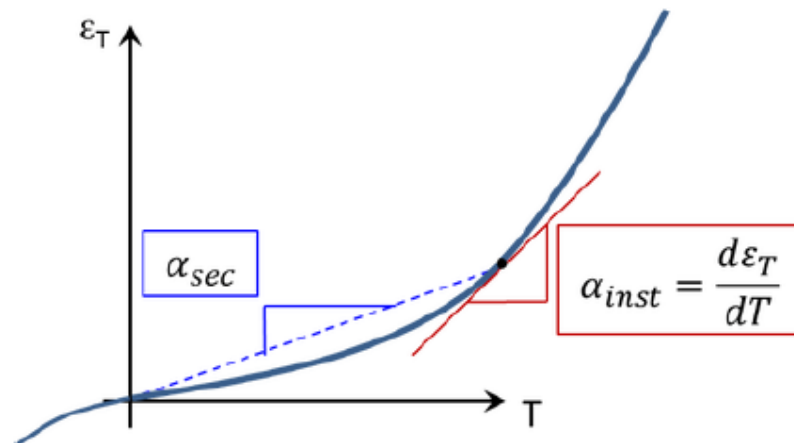
Los valores de coeficientes de expansión térmica obtenidos para los materiales S275 están clasificados como coeficientes instantáneo y medio respectivamente. A continuación, se explican las diferencias entre tipos de coeficientes. Las ecuaciones que expresan su valor han sido obtenidas de [54] :

- Coeficiente de expansión térmica secante (o lineal): se obtiene como cociente entre la deformación térmica ( $\epsilon_T$ ) para la temperatura alcanzada, dividido entre la diferencia de temperaturas entre la temperatura alcanzada y la de referencia. La ecuación que lo determina se expresa como:

$$\alpha_{sec} = \frac{\epsilon(T)}{T - T_{ref}} = \frac{L - L_{ref}}{L_{ref} \cdot (T - T_{ref})}$$

- Coeficiente de expansión térmica medio: es el coeficiente de expansión lineal promedio para un rango de temperaturas.
- Coeficiente de expansión térmica instantáneo: se define como la pendiente en cada punto de la curva deformación térmica – temperatura. La expresión matemática que lo recoge es:

$$\alpha_{inst} = \frac{d\epsilon_T}{dT} = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT}$$



En la siguiente figura se muestran las diferencias entre el coeficiente secante e instantáneo:

**Ilustración 79. Coeficientes de expansión térmica.**

En un material cuya curva  $\varepsilon_T$ - $T$  es lineal (material ideal) el coeficiente de expansión secante e instantáneo coinciden.

La temperatura de referencia es aquella para la cual se considera que no hay deformaciones térmicas. Para el material S275 se ha configurado como referencia la temperatura ambiente ( $T=25^\circ\text{C}$ ).

#### **3.4.4. Análisis Estructural.**

Se ha realizado un análisis transitorio estructural el cual ha sido resuelto como una secuencia de análisis estacionarios. Cada uno de estos análisis estacionarios ha sido configurado con los casos de carga obtenidos en el análisis transitorio térmico, de forma que en cada nueva resolución del modelo se tiene en cuenta el estado tensional anterior, obteniéndose el estado tensional final o tensiones residuales de soldadura.

El procedimiento empleado por el software de análisis ANSYS 2020 R1 para la obtención de cada uno de los estados tensionales se basa en la obtención de las distintas distorsiones que sufre la malla de elementos debido a las distintas cargas que se le aplican. La principal fuente de distorsión son los gradientes térmicos obtenidos en el análisis térmico, además de las condiciones de contorno aplicadas en el modelo.

Se ha configurado un análisis de tipo lineal configurando el comportamiento elástico del material de forma que la suma de las distorsiones de cada elemento de la malla es el resultado de la suma de la distorsión elástica y la distorsión generada por los gradientes térmicos:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^E + \Delta\varepsilon^T$$

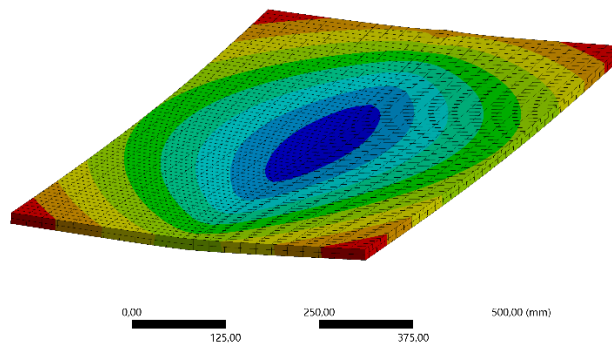
En cada uno de los casos de carga resueltos, no se ha tenido en cuenta aquellos elementos que, en el análisis térmico correspondiente, superaban la temperatura de austenización genérica del

acero (723 °C). De este modo, no aportan rigidez al modelo global ya que se encuentran en un estado de cambio de fase cristalina.

Las condiciones de contorno aplicadas en el modelo representan la sujeción lateral del cupón, las cuales restringen los desplazamientos y los giros. El análisis estructural ha sido resuelto con un valor de la gravedad de 9.81 m/s<sup>2</sup>, con el objetivo de recoger los efectos del peso propio del cupón.

**C: Transient Structural**  
Figure  
Type: Directional Deformation(Z Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 291  
21/10/2020 18:41

**0,0074359 Max**  
0,53331  
-1,0741  
1,6148  
-2,1555  
-2,6963  
-3,2257  
3,7778  
-4,3185  
**-4,8593 Min**



**Ilustración 80. Deformación de 1 Línea de Calor**

# ***CAPITULO 4.***

# ***RESULTADOS***

## ***CAPITULO 4. RESULTADOS.***

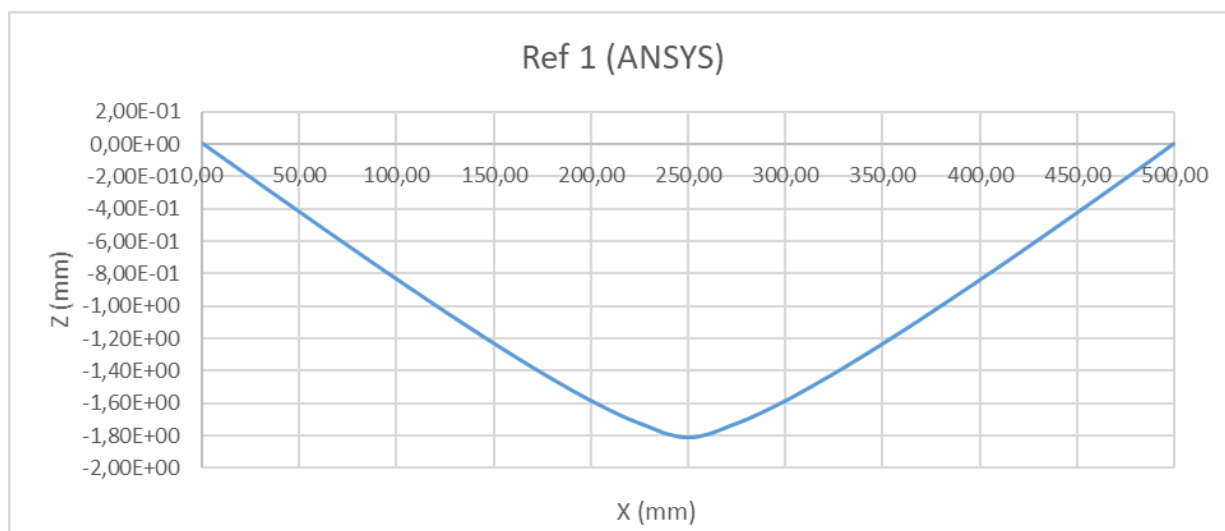
### ***4.1. INTRODUCCIÓN.***

En la siguientes líneas del presente capítulo, se procederá a detallar mediante el uso de graficas los datos obtenidos de la simulación de una línea de calor en los dos aceros de los cuales a lo largo del Capítulo 3 se han descrito sus propiedades tanto térmicas como mecánicas. Solamente se han incluido las gráficas de la aplicación de 1 línea de calor, debido a que los resultados de los ensayos de 3 líneas de calor se asemejan mucho a las obtenidas en el ensayo experimental.

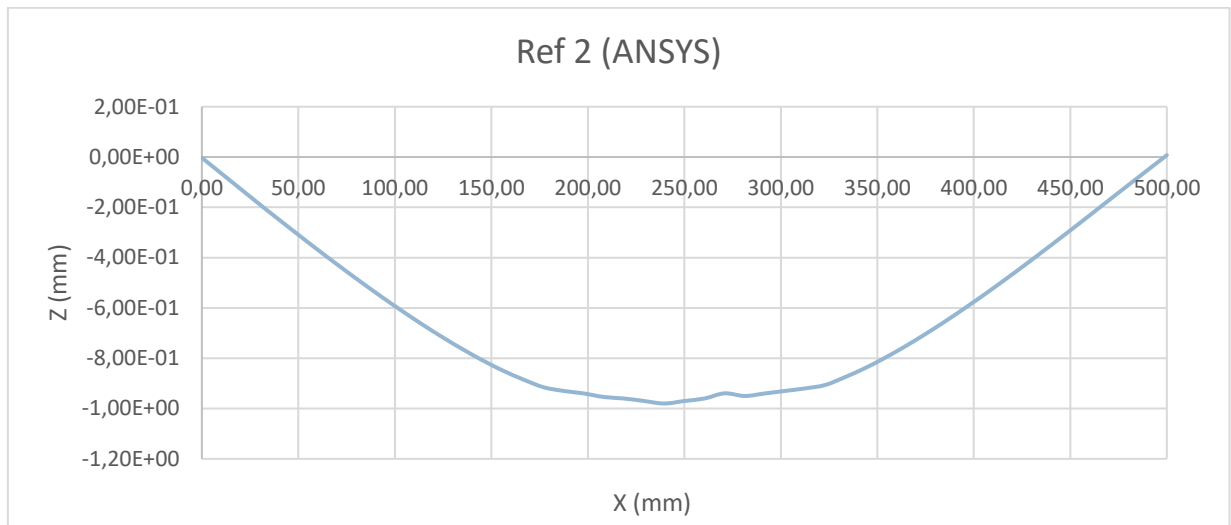
En las siguientes graficas cabe destacar respecto a la referencia del ancho están en forma cóncava mientras que en el ensayo experimental están de forma convexa debido a que las mediciones de la magnitud se hicieron en sentido contrario.

#### ***4.1.1. Resultados tras el Modelado.***

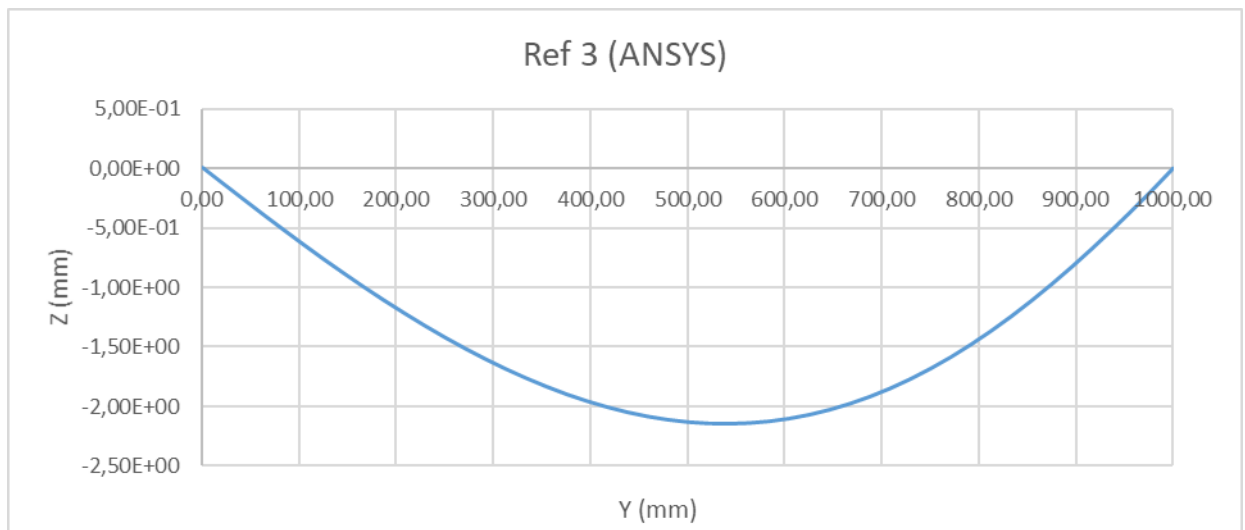
Se presentan las diferentes graficas obtenidas tras las realización del ensayo por Elementos Finitos del acero S275.



**Ilustración 81. REF 1 1 línea de Calor ANSYS (S275)**

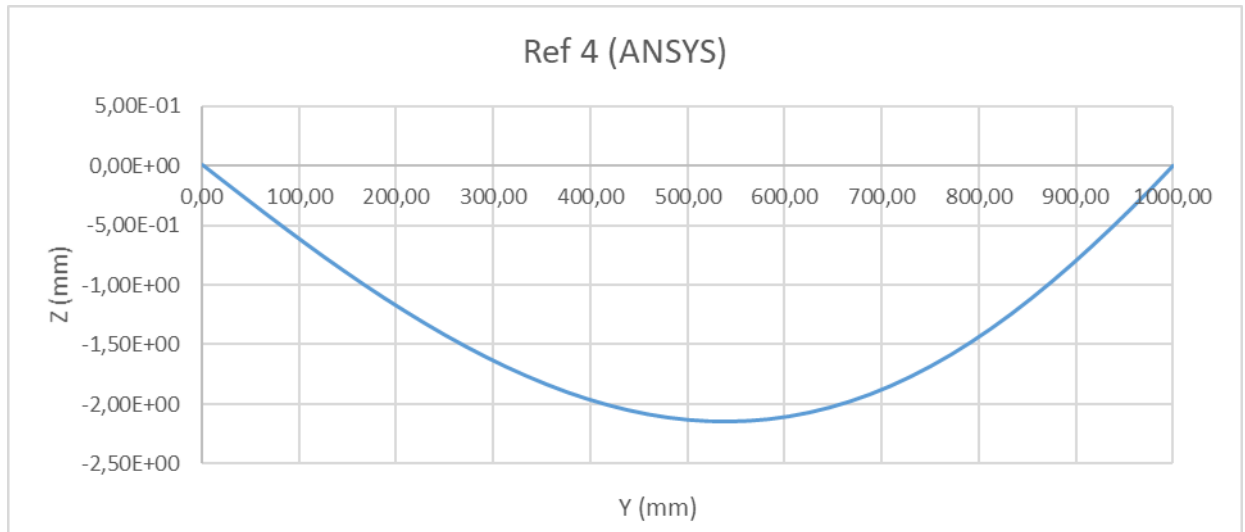


**Ilustración 82. REF 2 1 línea de Calor ANSYS (S275)**



**Ilustración 83. REF 3 1 línea de Calor ANSYS (S275)**

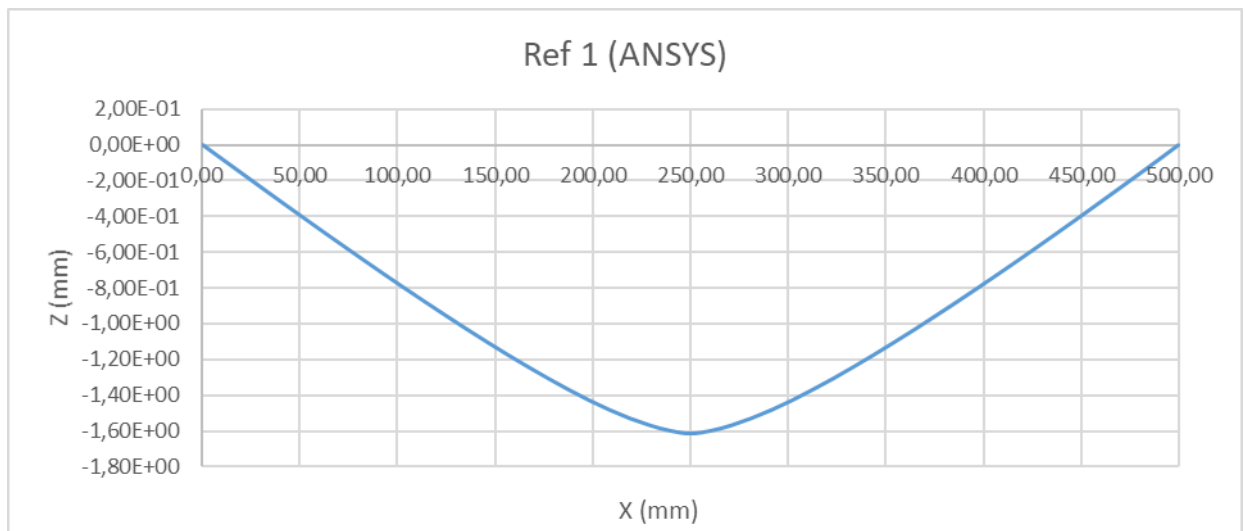




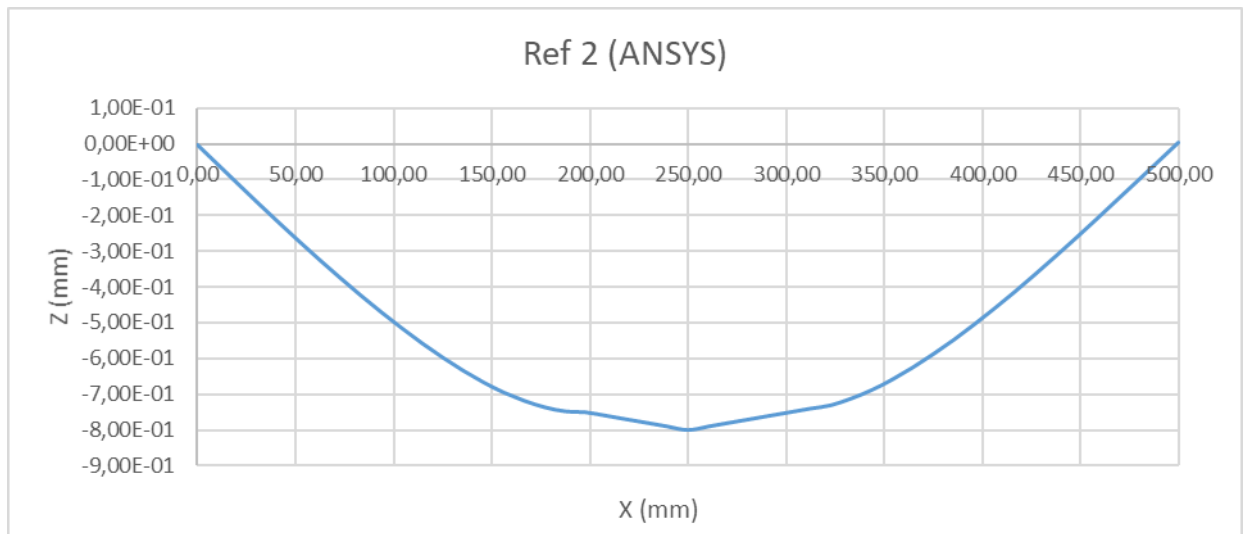
**Ilustración 84. REF 4 1 línea de Calor ANSYS (S275)**

#### **4.1.2. Resultados del AH32**

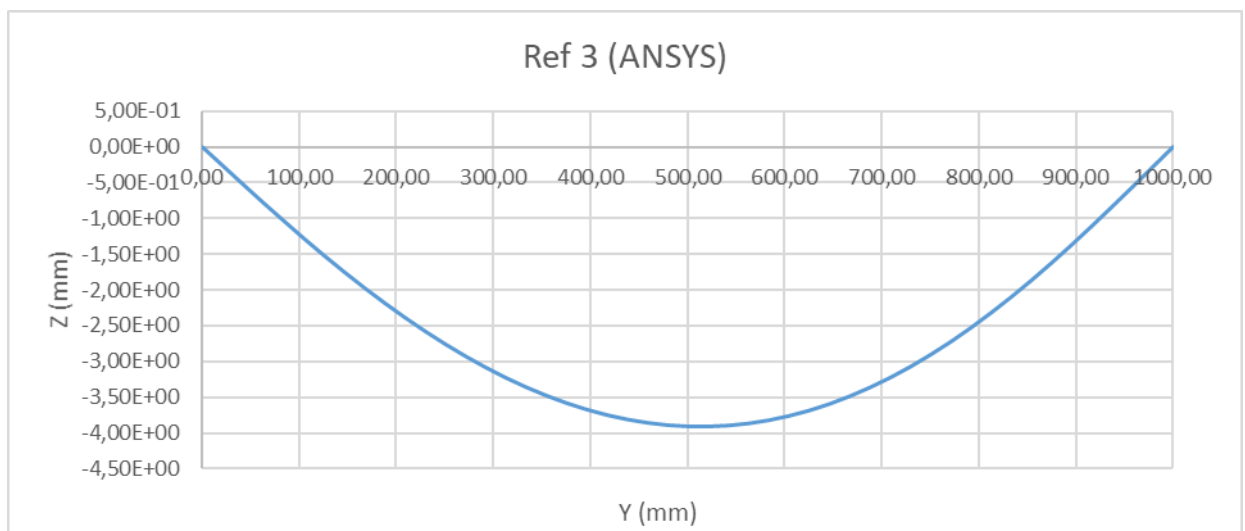
Se presentan las diferentes graficas obtenidas tras las realización del ensayo por Elementos Finitos del acero AH32.



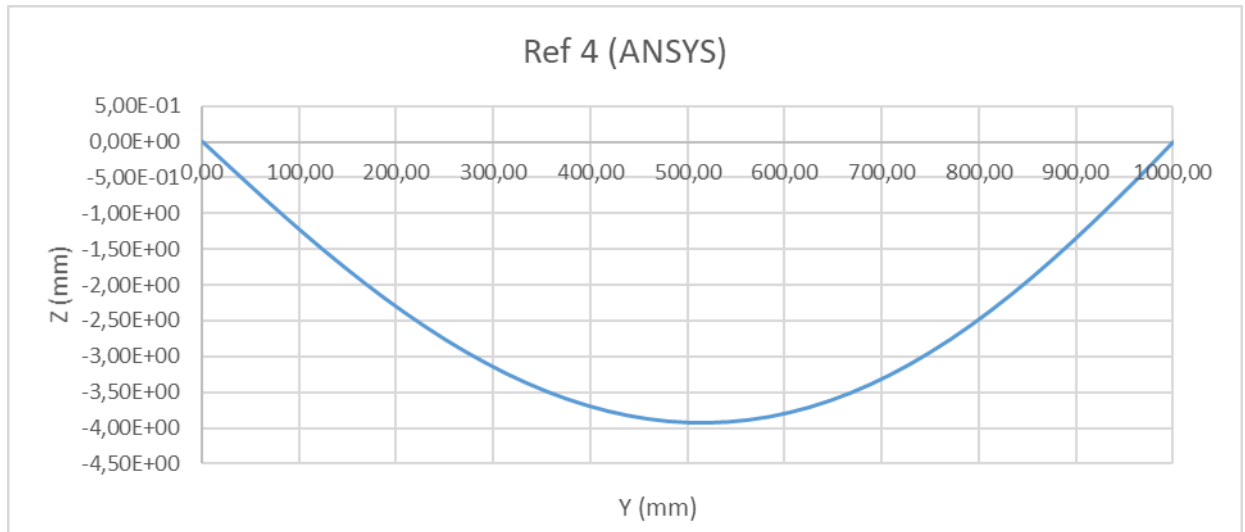
**Ilustración 85. REF 1 1 línea de Calor ANSYS (AH32)**



**Ilustración 86. REF 2 1 línea de Calor ANSYS (AH32)**



**Ilustración 87. REF 3 1 línea de Calor ANSYS (AH32)**



**Ilustración 88. REF 4 1 línea de Calor ANSYS (AH32)**

# ***CAPITULO 5.***

# ***CONCLUSIONES***

## ***CAPITULO 5. CONCLUSIONES***

### ***5.1. INTRODUCCIÓN.***

Este capítulo se divide en tres apartados dedicados, respectivamente, a recapitular los trabajos desarrollados en el trabajo, enumerar las aportaciones que en ella se recogen y, finalmente, proponer actuaciones de futuro que completen sus contenidos.

### ***5.2. RESUMEN DE LOS TRABAJOS DESARROLLADOS.***

En el Capítulo 2 se presenta el estado del arte del método de curvado por llama, que es el objeto principal de estudio de este trabajo, destacando las diferentes métodos de curvado, los diferentes métodos de calentamiento y las diferentes temperaturas dependiendo de la composición de los aceros. Los objetivos del trabajo que se establecen en el Capítulo 1, obedecen a la necesidad de desarrollar una metodología experimental, analítica y numérica que permita alcanzar una óptima ejecución del tratamiento de curvado mediante líneas de calor. En concreto a lo largo del Capítulo 2 incluye las siguientes pautas:

- Se presenta una descripción de la evolución de la técnica, en la que se pone de manifiesto que incluso, a fecha de hoy, su aplicación práctica se concibe más como un arte que como una tecnología científica.
- Puesto que el método de curvado es el objeto de estudio que protagoniza este trabajo se desarrolla en este Capítulo 2 una exposición relativa a la metodología y a los procesos físicos que van asociados a él, apoyándose en referencias de contrastada relevancia.
- Se exponen las diferentes metodologías que engloban el curvado, o las diferentes aplicaciones que desarrollan esta técnica.
- Por último, se hace un pequeño estudio del comportamiento de los diferentes aceros en función de la aplicación de calor, en función de su composición química.

A lo largo del Capítulo 3 se incluye una recopilación de la información disponible sobre las propiedades de los aceros presentes en el trabajo. En la segunda parte del capítulo se ha destinado a la explicación del proceso del ensayo analítico y las diferentes fases que debemos realizar para la elaboración de nuestro modelo por Elementos Finitos.

En el Capítulo 4 se ha explicado mediante graficas de los datos obtenidos del modelo por Elementos Finitos, de los dos tipos de aceros que se han ensayado. Y podemos decir que se asemejan las gráficas de los dos aceros y ya se puede prever la deformación. En el Capítulo 5, se detallan las gráficas obtenidas tras la realización de los ensayos mediante Elementos Finitos, para los dos tipos de aceros presentes en el trabajo.



# ***BIBLIOGRAFIA***



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] D. SCHÄFER, V. RINALDI, D. BEG, P. MOŽE, R. LACALLE, J. PORTILLA, D. FERREÑO, J.A. ÁLVAREZ, R WILLMS AND J. SCHÜTZ. OPTIMIZATION AND IMPROVEMENT OF THE FLAME STRAIGHTENING PROCESS (OPTISTRAIGHT). FINAL REPORT. RESEARCH FUND FOR COAL AND STEEL RFSR-CT-2007-00040. EUROPEAN COMMISSION. 2012.
- [2] D. RADAJ. HEAT EFFECTS OF WELDING. TEMPERATURE FIELD, RESIDUAL STRESS, DISTORTION. CHAPTER 1, INTRODUCTION. SPRINGER-VERLAG. 1992.
- [3] J. LÓPEZ RODRÍGUEZ. FUNDAMENTOS DE CONFORMACIÓN POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA. DEPT. DE INGENIERÍA DE MATERIALES Y FABRICACIÓN. E.T.S. DE INGENIERÍA INDUSTRIAL. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA. NOVIEMBRE 2011.
- [4] A. RODRÍGUEZ, B. SANTOS AND D. FERNÁNDEZ. REPORT ON MATERIAL MODELS FOR SUPPORT STRUCTURES. IRPWIND PROJECT FP7 N° 609795. DELIVERABLE 73.2. FEBRUARY 2017.
- [5] F. MARTÍNEZ CONTRERAS. PROPIEDADES MECÁNICAS EN ACEROS DE BAJO CARBONO LAMINADOS EN FRÍO. TESIS DE UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN. JUNIO 2002.
- [6] C. HAKAN GÜR AND J. PAN. HANDBOOK OF THERMAL PROCESS MODELING OF STEELS. CHAPTER 4 MECHANICAL METALLURGY OF THERMAL PROCESSING, B. SMOLJAN. CRC PRESS. 2009.
- [7] BOC LINDE GROUP. FUNDAMENTALS OF FLAME STRAIGHTENING. TECHNICAL INFORMATION FOR FLAME PROCESSES. 2009.
- [8] H.K. LIM AND J-S LEE. ON THE MATERIAL PROPERTIES OF SHELL PLATE FORMED BY LINE HEATING. INT. JOURNAL OF NAVAL ARCHITECTURE AND OCEAN ENGINEERING, 9, 66-76, ELSEVIER. AUGUST 2016.
- [9] T. WURZLER, T. LINDEMANN, J. KISTNER AND P. KAEDING. DEVELOPMENT OF PARAMETRIC SIMULATION MODELS FOR METAL FORMING PROCESSES OF PLATE STRUCTURES. PROCEEDINGS OF THE ASME 2018 37TH INT. CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARTIC ENGINEERING OMAE 2018-77110. MADRID, JUNE 2018.
- [10] M. BOJHAR, H. PROMMER ET ALT. 3-DIMENSIONAL FORMING OF THICK PLATES – A COMPARISON OF DEEP DRAWING AND AN APPROACH OF ROLLING AND BENDING WITHIN A SINGLE PROCESS.
- [11] JOÃO LUÍS PADRÃO DE BRITO CÂMARA. SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING. UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA - IST. SEPTEMBER 2009.

- [12] G. LEE AND S. KIM. CASE STUDY OF MASS CUSTOMIZATION OF DOUBLE-CURVED METAL FAÇADE PANELS USING A NEW HYBRID SHEET METAL PROCESSING TECHNIQUE. JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT VOL. 138 NO. 11 PP 1322-1330. ASCE. NOVEMBER 2012.
- [13] CHERA, O. BOLOGA ET ALT. ROBOT-FORMING – AN INCREMENTAL FORMING PROCESS USING AND INDUSTRIAL ROBOT BY MEANS OF DELMIA SOFTWARE PACKAGE. APPLIED MECH. AND MATER. VOL. 371 PP 416-420. TRANS TECH PUBLICATIONS. AUGUST 2013.
- [14] J. PARK, D. KIM, C. HYUN ET ALT. THERMAL FORMING AUTOMATION SYSTEM FOR CURVED HULL PLATES IN SHIPBUILDING: ANALYSIS AND DESIGN. INT. JOURNAL OF COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING VOL. 29, Nº3 PP. 287-297. TAYLOR AND FRANCIS. MARCH 2015.
- [15] T. YOSHIHIKO, I. MORINOBU, AND S. HIROYUKI. “IHIMU-A” A FULLY AUTOMATED STEEL PLATE BENDING SYSTEM FOR SHIPBUILDING. IHI ENGINEERING REVIEW, VOL. 44 NO. 1. 2011.
- [16] K.S. LEE AND B. HWANG. AN APPROACH TO TRIANGULAR INDUCTION HEATING IN FINAL PRECISION FORMING OF THICK STEEL PLATES. J. OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 214, PP. 1008-1017. ELSEVIER. NOVEMBER 2013.
- [17] STUDY ON HOT MULTI-POINT FORMING PROCESS WITH COOLING SYSTEM FOR AL THICK PLATE BY USING NUMERICAL ANALYSIS. IN-KYU LEE, SUNG-YUN LEE, MYEONG-SIK JEONG, SUN-KWANG HWANG, YONG-JAE CHO, BYUNG-MIN KIM, DAE-CHEOL KO, SEON-BONG LEE, SANG-KON LEE. PROCEA ENGINEERING 207. ELSEVIER. 2017.
- [18] LASER ASSISTED FORMING FOR SHIP BUILDING. G. DEARDEN, S. P. EDWARDSON. THE UNIVERSITY OF LIVERPOOL. JUNE 2003.
- [19] FEASIBILITY STUDY ON FLEXIBLY RECONFIGURABLE ROLL FORMING PROCESS FOR SHEET METAL AND ITS IMPLEMENTATION. JUN-SEOK YOON, JEONG KIM, HYEONG-HO KIM, AND BEOM-SOO KANG. ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING. VOLUME 2014. JUNE 2014. HINDAWI PUBLISHING CORPORATION.
- [20] ABILITY OF THE FLEXIBLE HYDROFORMING USING SEGMENTED TOOL. NACEUR SELMI. HEDI BEL HADJ SALAH. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY. JULY 2016.
- [21] THE NATIONAL SHIPBUILDING RESEARCH PROGRAM. LINE HEATING. U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. NOVEMBER 1982.
- [22] TESOL. AUTÓMATA PARA CONFORMADO POR LÍNEAS DE CALOR. TÉCNICA INDUSTRIAL, 248, PÁGS. 70-74. MARZO 2003.

- [23] EFD INDUCTION. DECK AND BULKHEAD STRAIGHTENING. A GUIDE TO THE BENEFITS OF INDUCTION HEATING. 2010.
- [24] D-S SHIM, D-Y YANG, S-W CHUNG AND M-S HAN. OPTIMIZATION OF FORMING STEPS IN THE INCREMENTAL FORMING OF TWISTED SHAPES USING A LINE ARRAY ROLL SET (LARS). INT. JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, VOL. 11 No 5 PP. 715-723. SPRINGER. OCTOBER 2010.
- [25] DO-SIK SHIM AND DONG-YOL YANG. MULTI-STAGE FORMING USING OPTIMIZED PREFORM IN THE LINE ARRAY ROLL SET PROCESS AND ITS INDUSTRIAL APPLICATION. INT. JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, VOL. 15 No 10 PP. 2085-2092. SPRINGER. OCTOBER 2014.
- [26] D.S. SHIM, D. Y. YANG S.W. CHUNG AND M.S: HAN. A STUDY ON THE APPLICATION OF LINE ARRAY ROLL SET PROCESS FOR THE MANUFACTURE OF REAL SHIP HULL PLATES. TRANSACTIONS OF MATERIAL PROCESSING VOL. 19 No 2. APRIL 2010.
- [27] UNE-EN 10025-2:2006. PRODUCTOS LAMINADOS EN CALIENTE PARA ESTRUCTURAS. PARTE 2: CONDICIONES TÉCNICAS DE SUMINISTRO DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES NO ALEADOS. AENOR.
- [28] RULES FOR MATERIALS AND WELDING. PART 2. AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. 2014.
- [29] RULES FOR THE CONSTRUCTION AND CLASSIFICATION OF STEEL SHIPS 2013. CR CLASSIFICATION SOCIETY. MAY 2016.
- [30] PREDICCIÓN DE TRANSFORMACIONES DE FASES EN ACEROS ENFOCADA A LA MEJORA DE MODELOS TERMO-MECÁNICOS. TESIS. AURORA PÉREZ ESPINOSA. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS DE POTOSÍ. JULIO DE 2018.
- [31] A.A. GORNI, STEEL FORMING AND HEAT TREATMENT HANDBOOK, [WWW.GORNI.ENG.BR/E/GORNI\\_SFHTHANDBOOK.PDF](http://WWW.GORNI.ENG.BR/E/GORNI_SFHTHANDBOOK.PDF).
- [32] EFFECT OF FABRICATING PROCEDURES IN ASSMBLING OF SHIP HULL STRUCTURE ON NOTCH TOUGHNESS OF STEEL PLATES (REPORT No.3). HIROSHI KIHARA, TSUMEO KUROKAWA, HIROSHI YAJIMA, JIRO SHUHARA, SHIGEO KATAOKA, TATSURO FUKAE. OSAKA UNIVERSITY, KYUSHU UNIVERSITY, NAGASAKI UNIVERSITY, MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. MARCH, 1973.
- [33] ESTUDIO DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FASES A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN ACEROS CON ESTRUCTURAS MIXTAS. R. RODRÍGUEZ, I. GUTIÉRREZ. CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES TÉCNICAS, UNIVERSIDAD DE NAVARRA. VIII CONGRESO NACIONAL DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE SÓLIDOS, GANDÍA 2002.

- [34] OPTIMIZATION AND IMPROVEMENT OF THE FLAME STRAIGHTENING PROCESS (OPTISTRAIGHT). D. SCHÄFER, V. RINALDI, D. BEG, P. MOŽE, R. LACALLE, J. PORTILLA, D. FERREÑO, J. A. ÁLVAREZ, R. WILLMS, J. SCHÜTZ. RESEARCH FUND FOR COAL & STEEL. EUROPEAN COMMISSION. 2012.
- [35] CRITICAL POINTS OF HYPOEUTECTOID STEEL – PREDICTION OF THE PEARLITE DISSOLUTION FINISH TEMPERATURE  $Ac1F$ . B. PAWLOWSKI. JOURNAL OF ACHIEVEMENTS IN MATERIALS AND MANUFACTURING ENGINEERING. VOLUME 49, ISSUE 2. 2011.
- [36] CALCULATION OF CRITICAL TEMPERATURES BY EMPIRICAL FORMULAE. J. TRZASKA. ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS. VOLUME 61. 2016.
- [37] ASM HANDBOOK. VOLUME 9. METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES. ASM INTERNATIONAL. 2004.
- [38] IMPLEMENTATION OF EUROCODES. HANDBOOK 5. DESIGN OF BUILDINGS FOR THE FIRE SITUATION. GUIDE TO BASIS OF STRUCTURAL RELIABILITY AND RISK ENGINEERING RELATED TO EUROCODES SUPPLEMENTED BY PRACTICAL EXAMPLES. LEONARDO DA VINCI PROJECT CZ/02/B/F/PP-134007. DEVELOPMENT OF SKILLS FACILITATING IMPLEMENTATION OF EUROCODES. MILAN HOLICKÝ. THE KLOKNER INSTITUTE OF THE CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE. 2005.
- [39] UNE-EN 1993-1-2: 2011. EUROCÓDIGO 3: PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO. PARTE 1-2: REGLAS GENERALES. PROYECTO DE ESTRUCTURAS SOMETIDAS AL FUEGO. AENOR.
- [40] GH GROUP. INDUCTION STRAIGHTENING SOLUTION FOR DECKS AND BULKHEADS. 2008.
- [41] TENSIONES RESIDUALES GENERADAS EN LA ZAC Y SU INFLUENCIA EN LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN LOS ACEROS HSLA, BAJO UN PROCESO DE SOLDEO POR ARCO SUMERGIDO. AURELIO MUÑOZ RUBIO. ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ALGECIRAS. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL E INGENIERIA CIVIL. TESIS DOCTORAL. CÁDIZ, 2009.
- [42] “EUROPEAN STRUCTURAL STEEL STANDARD EN 1025”, 1992
- [43] “EUROPEAN STRUCTURAL STEEL STANDARD EN 10027”, 1993
- [44] UNE-EN 10169 “PRODUCTOS PLANOS DE ACERO, RECUBIERTOS EN CONTINUO DE MATERIAS ORGÁNICAS (PRELACADOS)”, AENOR 2007.
- [45] UNE-EN 10162 “PERFILES DE ACERO CONFORMADOS EN FRÍO. CONDICIONES TÉCNICAS DE SUMINISTRO. TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.”, AENOR 2007).
- [46] UNE EN 10210 “PERFILES HUECOS PARA CONSTRUCCIÓN, ACABADOS EN CALIENTE, DE ACERO NO ALEADO Y DE GRANO FINO”, AENOR 2006.).

- [47] UNE EN 10219 “PERFILES HUECOS PARA CONSTRUCCIÓN SOLDADOS, CONFORMADOS ENFRÍO DE ACERO NO ALEADO Y DE GRANO FINO”, AENOR 2006.)
- [48] UNE-EN 10025-2:2006 “PRODUCTOS LAMINADOS EN CALIENTE DE ACEROS PARA ESTRUCTURAS. PARTE 2: CONDICIONES TÉCNICAS DE SUMINISTRO DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES NO ALEADOS”, AENOR, 2006.
- [49] UNE-EN 10169 “PRODUCTOS PLANOS DE ACERO, RECUBIERTOS EN CONTINUO DE MATERIAS ORGÁNICAS (PRELACADOS)”. AENOR 2007.
- [50] UNE-EN 10326 “CHAPAS Y BANDAS DE ACERO ESTRUCTURAL RECUBIERTAS EN CONTINUO POR INMERSIÓN EN CALIENTE”. AENOR 2007.
- [51] UNE-EN 10034:1994. “PERFILES I Y H DE ACERO ESTRUCTURAL. TOLERANCIAS DIMENSIONALES DE FORMA”, AENOR 1994.
- [52] JAVIER BELZUNCE VARELA; MATERIALES ESTRUCTURALES; ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN; UNIVERSIDAD DE OVIEDO, 2012.
- [53] S.J. HEMMATIA, J.G. SHINB,” ESTIMATION OF FLAME PARAMETERS FOR FLAME BENDING PROCESS”. INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE 47, PAG. 799–804, (2007).
- [54] THERMAL LINEAR EXPANSION OF NINE SELECTED AISI STAINLESS STEELS. CINDAS. REPORT 51. APRIL 1978.